

УДК 669.295:621.772.1/2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В ТИТАНЕ, ЛЕГИРОВАННОМ КИСЛОРОДОМ

ПЕРЕПЕЛКИНА М. Н. <sup>1\*</sup>,  
ГЛОТКА Т. А. <sup>2</sup>,  
ШЕВЧЕНКО В. Г. <sup>3</sup>, *к.т.н.*,  
КОВАЛЕНКО Т. А. <sup>4</sup>, *к.т.н.*,  
ОМЕЛЬЧЕНКО О. С. <sup>5</sup>

<sup>1\*</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>2</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>3</sup> Кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: glotka87@ukr.net

<sup>4</sup> Кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: tamara.kovalenko.84@mail.ru

<sup>5</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.** Проведение интенсивной пластической деформации для титановых сплавов с повышенным содержанием кислорода связано с рядом трудностей, возникающих еще на стадии введения кислорода в титановые сплавы. Температурные параметры деформации существенно влияют на возможность получения субмикроструктурной структуры в кислородсодержащих титановых сплавах независимо от способа введения кислорода в них. **Методика.** В качестве исходных заготовок для интенсивной пластической деформации применяли слитки титана с различным содержанием кислорода, полученные вакуумно-дуговым переплавом. Кислород вводили в слитки двумя способами: посредством газовой фазы при восстановлении титана губчатого и введением кислородсодержащих соединений в шихту при переплаве. Интенсивную пластическую деформацию осуществляли методом винтовой экструзии. **Результаты.** Рассмотрено влияние температуры деформации на эффективность интенсивной пластической деформации титановых сплавов, легированных кислородом. Установлены причины разрушения части заготовок, изготовленных из титана с кислородсодержащими соединениями, в процессе деформации методом винтовой экструзии. На основе измерения микротвердости и микроструктурных исследований определены оптимальные температурные режимы интенсивной пластической деформации. **Научная новизна.** Распирены представления о совместном влиянии структурных и температурных факторов на деформацию титановых сплавов с повышенным содержанием кислорода. **Практическая значимость.** Использование кислородсодержащих титановых сплавов с субмикроструктурной структурой с повышенными механическими характеристиками при сохранении низкой стоимости позволит применять их взамен сложнолегированных сплавов.

**Ключевые слова:** титан; кислород; легирование; интенсивная пластическая деформация; субмикроструктурная структура

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРНИХ ТА ТЕМПЕРАТУРНИХ ФАКТОРІВ НА ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ В ТИТАНІ, ЛЕГОВАНОМУ КИСНЕМ

ПЕРЕПЬОЛКІНА М. М. <sup>1\*</sup>,  
ГЛОТКА Т. А. <sup>2</sup>,  
ШЕВЧЕНКО В. Г. <sup>3</sup>, *к.т.н.*,  
КОВАЛЕНКО Т. О. <sup>4</sup>, *к.т.н.*,  
ОМЕЛЬЧЕНКО О. С. <sup>5</sup>,

<sup>1\*</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>2</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>3</sup> Кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: glotka87@ukr.net

<sup>4</sup> Кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061)769 83 62, e-mail: tamara.kovalenko.84@mail.ru

<sup>5</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.** Проведення інтенсивної пластичної деформації для титанових сплавів з підвищеним вмістом кисню пов'язано з рядом складнощів, які виникають ще на стадії введення кисню в титанові сплави. Температурні параметри деформації суттєво впливають на можливість отримання субмікроструктурної структури в кисневмісних титанових сплавах незалежно від способу введення кисню в них. **Методика.** В якості вихідних заготовок для інтенсивної пластичної деформації використовували зливки титану з різним вмістом кисню, отримані вакуумно-дуговим переплавом. Кисень вводили у зливки двома способами: через газову фазу при відновленні титану губчатого та введенням кисневмісних з'єднань до шихти під час переплаву. Інтенсивну пластичну деформацію проводили за методом гвинтової екструзії. **Результати.** Розглянуто вплив температури деформації на ефективність інтенсивної пластичної деформації титанових сплавів, легованих киснем. Встановлено причини руйнування частини заготовок, виготовлених з титану з кисневмісними з'єднаннями, в процесі деформації за методом гвинтової екструзії. На основі вимірювання мікротвердості та мікроструктурних досліджень визначено оптимальні температурні режими інтенсивної пластичної деформації. **Наукова новизна.** Розширено уявлення про спільний вплив структурних та температурних факторів на деформацію титанових сплавів з підвищеним вмістом кисню. **Практична значимість.** Використання кисневмісних титанових сплавів з субмікроструктурною структурою з підвищеними механічними властивостями при збереженні низької вартості дозволяє застосовувати їх замість складно легованих сплавів.

**Ключові слова:** титан; кисень; легування; інтенсивна пластична деформація; субмікроструктурна структура

## INVESTIGATION OF THERMAL AND STRUCTURE FACTORS INFLUENCE ON FORMATION OF SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE IN OXYGEN ALLOYED TITANIUM

PEREPOLKINA M. N. <sup>1\*</sup>,  
GLOTKA T. A. <sup>2</sup>,  
SHEVCHENKO V. G. <sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*  
KOVALENKO T. O. <sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*  
OMELCHENKO O. S. <sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Department "Mechanics", Zaporozhye National Technical University, Zhukovskogo St., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061)769 83 62, e-mail: margoperepelkina@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-8236-1015

<sup>2</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>3</sup> Department "Mechanics", Zaporozhye National Technical University, Zhukovskogo St., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061)769 83 62, e-mail: glotka87@ukr.net

<sup>4</sup> Department "Mechanics", Zaporozhye National Technical University, Zhukovskogo St., 64, 69063, Zaporozhye, Ukraine, tel. +38 (061)769 83 62, e-mail: tamara.kovalenko.84@mail.ru

<sup>5</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.** Severe plastic deformation realization for titanium alloys with increased oxygen contents is associated with a range of complications that arise on step of oxygen introduction into titanium alloys. Temperature deformation parameters considerably influence capability of submicrocrystalline structure obtaining in oxygen-containing titanium alloys regardless of oxygen introduction method. **Methodology.** Titanium ingots with varied oxygen content obtained after vacuum-arc refining were exploited as incoming billet for severe plastic deformation. Oxygen was introduced into ingots by two methods: during reduction through gaseous phase and by introduction of oxygenated compounds into charge during refining. Severe plastic deformation was carried out by method of screw extrusion. **Results.** Deformation temperature influence on efficiency of severe plastic deformation for oxygen alloyed titanium was considered. Rupture reasons of some billet parts, obtained from titanium with oxygen-containing compounds, during deformation process by method of screw extrusion were ascertained. Based on microhardness measurement and microstructure investigation optimal temperature modes of severe plastic deformation were determined. **Scientific novelty.** Conception about joint influence of structure and temperature factors on deformation of titanium alloys with increased oxygen content was extended. **Practical value.** Utilization of oxygen-containing titanium alloys with submicrocrystalline structure and increased mechanical properties with low cost saving allows to use them instead of complexly-alloyed ones.

**Keywords:** titanium; oxygen; alloying; severe plastic deformation; submicrocrystalline structure

## Введение

Сплавы титана с кислородом – перспективный материал для химической и нефтяной промышленности, судостроения, энергетики благодаря высокой прочности и коррозионной стойкости. К тому же они не содержат в своем составе дорогостоящих легирующих элементов.

Однако прочность существующих нелегированных титановых сплавов с кислородом в ряде случаев недостаточна, поэтому на данном этапе необходимо искать пути дополнительного повышения прочностных характеристик кислородсодержащих титановых сплавов.

Известно, что деформационные методы воздействия на структуру металлов дают возможность повысить механические свойства. К таким методам относится интенсивная пластическая деформация (ИПД), в ходе которой происходит измельчение структуры до нано- и субмикроструктурного (СМК) состояния. Наноструктурные материалы на сегодняшний день внедряют в авиационную, космическую технику, железнодорожный транспорт [7,8,11]. По различным данным для титановых сплавов в результате ИПД достигнуто повышение прочности на 40...50 % [1,12,14].

Производство титановых сплавов с повышенным содержанием кислорода связано с рядом сложностей, к которым, прежде всего, можно отнести получение заданного содержания кислорода и однородного его распределения по объему слитка [9]. Так, в работе [5] указывалось на большой разброс свойств и существенное снижение пластичности при выплавке титановых сплавов с введением в шихту  $TiO_2$ , что связывали с наличием концентрационных неоднородностей и кислородсодержащих включений в слитках. Избежать перечисленных недостатков возможно за счет использования технологии введения кислорода непосредственно в титан губчатый в процессе магнийтермического восстановления с применением аргонокислородных смесей [3].

В настоящей работе предложено использование комплексного подхода к упрочнению экономно-легированных титановых сплавов, который заключается в легировании титана кислородом и получении субмикроструктурной (СМК) структуры.

## Цель

Определение влияния температурных параметров ИПД и структурных факторов на формирование субмикроструктурной (СМК) структуры в титане, легированном кислородом.

## Методика исследований

В качестве исходных заготовок для ИПД применяли слитки титана  $\varnothing$  60 мм, высотой 75 мм с различным содержанием кислорода, полученные вакуумно-дуговым переплавом. Кислород вводили в слитки двумя способами: посредством газовой фазы

при восстановлении титана губчатого и введением кислородсодержащих соединений в шихту при переплаве. Химический состав слитков определяли спектральным методом с использованием прибора «SPECTROMAX». Для определения содержания кислорода применяли газоанализатор модели ON900 фирмы «ELTRA». Из слитков вырезали призматические заготовки размерами 10×20×40 мм. ИПД осуществляли методом винтовой экструзии (ВЭ) по технологии, разработанной в ДонФТИ им. А. А. Галкина [2]. Максимальная величина деформации за один проход при ВЭ составляла  $\epsilon=2$ . Форма и размеры заготовки после ИПД практически не изменялись. Температуры ИПД титана, легированного кислородом, выбирали с учетом результатов ранее проведенных исследований [6].

Микроструктурный анализ проводили с помощью оптического микроскопа «НЕОРНОТ-32» на шлифах, изготовленных в продольном и поперечном сечениях заготовок. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке индентора  $P=0,5$  Н в соответствии с требованиями ГОСТ 9450 – 76.

## Результаты исследований и их обсуждение

ИПД проводилась на литых заготовках, структура которых представляла собой  $\beta$ -превращенные зерна диаметром до 1000 мкм, внутри которых располагались пластины  $\alpha$ -фазы шириной 15...35 мкм.

Температуры и режимы деформации, микротвердость образцов до и после ИПД приведены в таблице 1.

В процессе деформации методом винтовой экструзии часть заготовок, изготовленных из титана с кислородсодержащими соединениями, разрушилась. Разрушение заготовок в процессе ВЭ, по-видимому, связано с наличием в структуре включений (нерастворившихся частиц  $TiO_2$ ), которые послужили концентраторами напряжений и привели к хрупкому разрушению заготовок, как было показано в работе [5].

Исследования показали, что кроме структурного фактора (наличие частиц  $TiO_2$ ) на разрушение заготовок из легированного кислородом титана оказывал влияние температурный режим ИПД. Поскольку кислород на титан оказывал упрочняющее действие, необходимым было повышение температуры ВЭ для увеличения деформационной способности титановой заготовки. Установлено, что реализацию деформации без разрушения заготовок из титановых сплавов с содержанием кислорода 0,3 % обеспечивало повышение температуры ВЭ в среднем на 100...150 °С по сравнению с режимами для нелегированного титана ВТ1-0. Необходимость увеличения температуры деформации заготовок можно также связать с повышением почти на 100 °С температуры фазового ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ )-превращения вследствие легирования титана кислородом, что показано в работе [10].

Таблица 1

**Режимы деформации и микротвердость образцов до и после ИПД / Deformation modes and microhardness of specimens before and after SPD**

Материал заготовки	Температура нагрева заготовки, °С	Давление прессования P <sub>1</sub> , МПа	Противодавление P <sub>2</sub> , МПа	Количество проходов при ИПД	Микротвердость (P=0,50 Н), МПа (до/после ИПД)
титан технический ВТ1-0	250	230,5	19,6	7	1000/ 2750
титан, легированный 0,3 % O <sub>2</sub> введением частиц TiO <sub>2</sub>	250	230,5	10,8	2 (разрушение)	-
	350			5	1050/ 3010
	450			7	1044/ 2900
	550			7	1065/ 1080
титан, выплавленный из губки, легированный 0,3 % O <sub>2</sub>	250	234,5	19,6	4 (разрушение)	-
	350			5	1045/ 3100
	450			7	1050/ 3077
	550			7	1038/ 1040

Деформация при температурах выше 450 °С не привела к упрочнению титановых сплавов. Микротвердость образцов находилась на уровне исходных литых образцов.

В целом введение 0,3% кислорода и последующая ИПД по оптимальному режиму привели к повышению микротвердости титановых сплавов на 180...200 %.

Анализ структурных изменений заготовок после ИПД показал, что в заготовках, деформированных при температурах выше 450 °С, происходили процессы рекристаллизации и роста зерен (до ~ 100 мкм), соответственно это не привело к упрочнению титана (рис. 1).



Рис. 1. Микроструктура заготовок из титана, легированного кислородом, после ИПД при 550 °С / Microstructure of oxygen alloyed titanium blanks after SPD at 550 °С

В то же время, структура заготовок, деформированных при температурах ниже 450 °С

состояла из зерен α-фазы, размеры которых находились в пределах 1 мкм (рис.2).



Рис. 2 Микроструктура заготовок из титана, легированного кислородом, после ИПД при 350 °С / Microstructure of oxygen alloyed titanium blanks after SPD at 350 °С

Микроструктурные исследования подтвердили, что в процессе деформации при температурах ниже 450 °С произошло измельчение зерен до СМК размеров. Согласно исследованиям, проведенным в работах [4,13,15,16], в процессе ИПД в зависимости от температуры деформации измельчение структуры может происходить за счет одновременного протекания нескольких процессов: фрагментации деформированных зерен и появления ориентированных структурных единиц (двойников, полос сдвига, полос деформации и т.д.), а также рекристаллизации, поскольку диффузионные процессы протекают за счет высоких давлений и степеней деформации.

Таким образом, титан, содержащий кислород в качестве легирующего элемента, возможно подвергать дополнительному упрочнению ИПД. Для получения СМК титана, легированного кислородом, предпочтительно использование технологии введения кислорода из газовой фазы на стадии производства титана губчатого. При этом температура деформации заготовок должна быть выше на 100...150 °С по сравнению с режимами для нелегированного титана ВТ1-0, что составляет 350...450 °С. Более высокие температуры при экструзии приводили к укрупнению зерна и разупрочнению заготовок.

#### Научная новизна и практическая значимость

Расширены представления о совместном влиянии структурных и температурных факторов на деформацию титановых сплавов с повышенным содержанием кислорода. Использование кислородсодержащих титановых сплавов с СМК структурой с повышенными механическими характеристиками при сохранении низкой стоимости позволит применять их взамен сложнoleгированных сплавов.

## Выводы

1. Кислород оказывает упрочняющее действие и повышает температуру полиморфного превращения, тем самым, снижая деформируемость сплавов. Температура деформации кислородсодержащих титановых сплавов на 100...150 °С выше температуры сплава ВТ1-0.

2. Установлено, что деформация титановых сплавов, содержащих кислород, при температурах

выше 450 °С не приводит к упрочнению сплавов вследствие рекристаллизации и значительного роста зерен. Титановые сплавы с содержанием кислорода 0,3% рекомендуется деформировать при температурах 350...450 °С.

3. Рекомендуемые температурные режимы ИПД привели к повышению микротвердости титана, легированного кислородом, на 180...200 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
/ REFERENCES

1. Влияние субмикроструктурной структуры и включений на деформацию и разрушение алюминиевых сплавов и титана / С. А. Никулин, С. В. Добаткин, В. Г. Ханжин, С. О. Рогачев, С. А. Чакушин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2009. – №5. – С.8-18.

*Vliyanie submikrokristallicheskoj struktury i vklucheniy na deformaciyu i razrushenie alyuminiyevykh splavov i titana* [Influence of submicrocrystalline structure and inclusions on deformation and rupture of aluminium alloys and titanium] / S. A. Nikulin, S. V. Dobatkin, V. G. Hanzhin, S. O. Rogachev, S. A. Chakushin // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. [Metal research and heat treatment of metals]. – 2009. – №5. – pp.8-18.

2. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Дон.: ТЕАН, 2003. – 85с.

*Vintovaya ekstruziya – protsess nakopleniya deformatsiy* [Screw extrusion – process of deformation accumulation] / Ya. E. Beygelzimer, V. N. Varyukhin, D. V. Orlov, S. G. Synkov. – Don.: TEAN, 2003. – 85p.

3. Давыдов, С. И. Получение титана с заданным содержанием кислорода / С. И. Давыдов, В. Г. Шевченко, А. В. Овчинников, А. А. Гаврилко, А. В. Осипенко // *Теория и практика металлургии*. – 2010. – №5-6. – С.6 – 10.

*Davydov, S. I. Poluchenie titana s zadannym sodержaniem kisloroda* [Obtaining of titanium with defined oxygen content] / S. I. Davydov, V. G. Shevchenko, A. V. Ovchinnikov, A. A. Gavrilko, A. V. Osipenko // *Teoriya i praktika metallurgii*. [Theory and practice of metallurgy]. – 2010. – №5-6. – pp.6 – 10.

4. Добаткин, С. В. Структура и свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов и возможности их применения / С. В. Добаткин // *Цветные металлы* – 2011. - №5. – С.77-82.

*Dobatkin, S. V. Struktura i svoystva ultramelkozernistykh alyuminiyevykh splavov i vozmozhnosti ikh primeneniya* [Structure and properties of ultrafine-grained aluminium alloys and their application possibilities] / S. V. Dobatkin // *Tsvetnyye metally*. [Non-ferrous metals]. – 2011. - №5. – pp.77-82.

5. Исследование влияния способа введения кислорода на структуру и свойства литого титана / С. И. Давыдов, В. Г. Шевченко, А. В. Овчинников [и др.] // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 48, ч. 3, - Дн-вск, ПГАСА, 2009.-С. 125-132.*

*Issledovanie vliyaniya sposoba vvedeniya kisloroda na strukturu i svoystva litogo titana* [Research of oxygen introduction method on structure and properties of cast titanium] / S. I. Davydov, V. G. Shevchenko, A. V. Ovchinnikov [et al.] // *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb.nauch. trudov*. [Construction engineering, material science, machine building: proceedings]. Issue 48, ch. 3, - Dn-vsk, PGASA, 2009.- pp. 125-132.

6. Коваленко, Т. А. Формирование стабильной субмикроструктурной структуры в титане / Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников // *МиТОМ*. – 2010. – №2. – С.35-43.

*Kovalenko, T. A. Vliyanie iskhodnoy struktury na mekhanizmy razrusheniya i mekhanicheskie svoystva submikrokristallicheskogo titana* [Influence of initial structure on rupture mechanisms and mechanical properties of submicrocrystalline titanium] / T. A. Kovalenko, A. V. Ovchinnikov // *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*. [New materials and technologies in metallurgy and machine building]. – 2010. - №1. – pp.72-80.

7. Лякишев Н.П. Наноматериалы конструкционного назначения / Н.П.Лякишев, М.И.Алымов, // *Российские нанотехнологии*, т.1. - № 1-2. – 2006. – с.71-81.

*Lyakishev N.P. Nanomaterialy konstruksionnogo naznacheniya* [Nanomaterials of constructional purpose] / N.P.Lyakishev, M.I.Alymov, // *Rossiyskie nanotekhnologii*. [Russian nanotechnologies]. – 2006. – t.1, № 1-2.– pp.71-81.

8. Мищенко, Т. М. Перспективні наноматеріали для залізничного транспорту / Т. М. Мищенко, Т. О. Носик // *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2008. – вип.25. – С. 34-36.

*Mishchenko, T. M. Perspektivni nanomaterialy dlya zaliznychnogo transportu* [Perspective materials for railway transport] / T. M. Mishchenko, T. O. Nosik // *Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana*. [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after V.Lazaryan]. – 2008. – Issue.25. – pp. 34-36.

9. Получение новых материалов на основе титана с повышенными механическими характеристиками и биологической совместимостью путем легирования кислородом с использованием камерной электрошлаковой технологии / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, О. А. Рябцева, С. И. Давыдов, Л. Я. Шварцман, К. Л. Феофанов // *Международная конференция Ti-2007 в СНГ (15-18.04.2007): сборник трудов*. – Ялта : РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2007. - С.89-93.

*Poluchenie novykh materialov na osnove titana s povyshennymi mekhanicheskimi kharakteristikami i biologicheskoy sovmestimostyu putem legirovaniya kislorodom s ispolzovaniem kamernoy elektroshlakovoy tehnologii* [Obtaining of new materials based on titanium with increased mechanical characteristics and biological compatibility by means of oxygen alloying with chamber electroslag technology utilization] / A. D. Ryabcev, A. A. Troyanskiy, O. A. Ryabceva, S. I. Davydov, L. Ya. Shvarcman, K. L. Feofanov // *Mezhdunarodnaya konferenciya Ti-2007 v SNG (15-18.04.2007): sbornik trudov*. [International Conference Ti-2007 in CIS: proceedings]. – Yalta : RIO IMP named after G. V. Kurdyumov NANU, 2007. - pp.89-93.

10. Снижко О. А. Влияние кислорода и термической обработки на формирование структур и свойств титана электрошлаковой выплавки: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.02.01 / Снижко О.А. – ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет», 2012., 156 с.

Snizhko O. A. *Vliyaniye kisloroda i termicheskoy obrabotki na formirovaniye struktur i svoystv titana elektroshlakovoy vyplavki*. Diss. [Influence of oxygen and heat treatment on structure and properties formation of electroslag refined titanium]. GVUZ «Doneckiy natsionalnyy tekhnicheskii universitet», 2012, 156 p.

11. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов с применением винтовой экструзии / А.Я. Качан, А.В. Овчинников, Д.В. Павленко, Шевченко В.Г., Кулагин Р.Ю., Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Распорня Д.В. // Вестник двигателестроения №1, 2012, с.92-97.

*Tekhnologicheskie osobennosti izgotovleniya lopatok kompressora GTD iz titanovykh spлавov s primeneniem vintovoy ekstruzii* [Technological aspects of gas turbine engine compressor blades production from titanium alloys by means of screw extrusion] / A.Ya. Kachan, A.V. Ovchinnikov, D.V. Pavlenko, Shevchenko V.G., Kulagin R.Yu., Beygelzimer Ya.E., Varyukhin V.N., Raspornya D.V. // Vestnik dvigatelestroeniya. [Bulletin of engine building]. - 2012 - №1. - pp.92-97.

12. Формирование СМК структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства / Г. А. Салищев, Р. М. Галеев, С. П. Мальшева, С. В. Жеребцов, С. Ю. Миронов, О. Р. Валиахметов, Э. В. Иванисенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. - №2. – С.19-26.

*Formirovaniye SMK struktury v titane i titanovykh spлавakh i ikh mekhanicheskie svoystva* [Submicrocrystalline structure formation in titanium and titanium alloys and their mechanical properties] / G. A. Salishchev, R. M. Galeev, S. P. Malysheva, S. V. Zherebtsov, S. Yu. Mironov, O. R. Valiakmetov, Ye. V. Ivanisenko // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. [Metal research and heat treatment of metals]. – 2006. - №2. – pp.19-26.

Статья рекомендована к публикации в журнале «Д-ром.техн.наук, проф. А. В. Овчинниковым (Украина); д-ром.техн.наук, проф. И. П. Волчком (Украина)

Поступила в редколлегию 23.03.2015

Принята к печати 23.03.2015

13. Greger M. Development microstructure and mechanical properties of commercially pure titanium processed by equal channel angular pressing and cold drawing / M.Greger, V.Masek // 4th International Conference Nanocon 2012 (Conference proceedings), Brno, Czech Republic, 23-25 October 2012, pp. 300-305.

Greger M. Development microstructure and mechanical properties of commercially pure titanium processed by equal channel angular pressing and cold drawing / M.Greger, V.Masek // 4th International Conference Nanocon 2012 (Conference proceedings), Brno, Czech Republic, 23-25 October 2012, pp. 300-305.

14. Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling / V. L. Sordi, M. Ferrante, M. Kawasaki, T. G. Langdon // J Mater Sci, november 2012, vol. 47, issue 22, pp. 7870-7876.

Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling / V. L. Sordi, M. Ferrante, M. Kawasaki, T. G. Langdon // J Mater Sci, november 2012, vol. 47, issue 22, pp. 7870-7876.

15. Mulyukov R. R. Production, properties and application prospects of bulk nanostructured materials / R. R. Mulyukov, R. M.Imaev, A. A.Nazarov // J Mater Sci, 2008, pp.7257-7263.

Mulyukov R. R. Production, properties and application prospects of bulk nanostructured materials / R. R. Mulyukov, R. M.Imaev, A. A.Nazarov // J Mater Sci, 2008, pp.7257-7263.

16. Terada D. Microstructure and mechanical properties of commercial purity titanium severely deformed by ARB process / D. Terada, S. Inoue, N. Tsuji // J Mater Sci, 2007, pp.1673-1681.

Terada D. Microstructure and mechanical properties of commercial purity titanium severely deformed by ARB process / D. Terada, S. Inoue, N. Tsuji // J Mater Sci, 2007, pp.1673-1681.