

УДК 669.295.669.76

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ТРУБ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-3Al-2.5V

ВАХРУШЕВА В.С. ¹, д.т.н., проф.,

ГРУЗИН Н.В. ², ассистент, м.н.с.

ЛИХОПЕК П.А. ,старший преподаватель³

¹кафедра материаловедения и обработки материалов. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +380676324532, e-mail: v.vahrusheva@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

²кафедра материаловедения и обработки материалов. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, ORCID ID: [0000-0002-7589-6548](https://orcid.org/0000-0002-7589-6548)

³Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта, ул. Академика Лазаряна,2, Днепр, Украина

Аннотация. Трубы из сплава титана Ti-3Al-2.5V используются в гидросистемах самолетов ведущих фирм «Боинг», «Аэробус» и др. и требуют высоких эксплуатационных свойств, поэтому возрастает роль технологических процессов их изготовления. В работе рассмотрена одна из стадий изготовления труб из титана – прессование. **Цель работы.** Установление особенностей формирования структуры и механических свойств труб из сплава Ti-3Al-2.5V на стадии прессования. **Методика исследования.** В работе исследована микроструктура металла с применением оптического и растрового электронного микроскопов. На растровом микроскопе исследования выполнены в обратнорассеянных электронах. Механические свойства исследованы на круглых образцах в продольном и поперечном направлениях при растяжении в соответствии с ГОСТ 1497-84. Также измеряли твердость по Бринеллю и Роквеллу в продольном и поперечном направлениях по толщине стенки. **Результаты.** Получены данные о формировании структуры и механических свойств при прессовании труб из сплава Ti-3Al-2.5V. В прессованных трубах имеет место анизотропия механических свойств, неоднородность структуры, связанные с температурно-деформационными параметрами процесса и, вероятно, с наследственностью послековки слитка. **Научная новизна.** Установлены закономерности формирования структуры и свойств труб из сплава Ti-3Al-2.5V в процессе прессования. Показано развитие при прессовании процессов динамической рекристаллизации и формирования неоднородных, разнородных структур, анизотропии свойств. **Практическая значимость.** На основании полученных результатов рекомендованы температурно-деформированные режимы горячего прессования для производства труб в промышленных условиях.

Ключевые слова: сплав титана Ti-3Al-2.5V, микроструктура, механические свойства, прессование.

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ ПРЕСУВАННІ ТРУБ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-3Al-2.5V

ВАХРУШЕВА В.С. ¹, д.т.н., проф.,

ГРУЗИН Н.В. ², асистент, м.н.с.

ЛИХОПЬОК П.А. ,старший викладач³

¹кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +380676324532, e-mail: v.vahrusheva@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

²кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: [0000-0002-7589-6548](https://orcid.org/0000-0002-7589-6548)

³Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту, ул. Академіка Лазаряна,2, Дніпро, Україна

Анотація. Труби із сплаву титану Ti-3Al-2.5V використовуються в гідросистемах літаків провідних фірм «Боїнг», «Аеробус» та ін. і потребують високих експлуатаційних властивостей, тому зростає роль технологічних процесів їх виготовлення. В роботі розглянута одна зі стадій виготовлення труб з титану – пресування. **Мета роботи.** Встановлення особливостей формування структури і механічних властивостей труб зі сплаву Ti-3Al-2.5V на стадії пресування. **Методика дослідження.** У роботі досліджена микроструктура металу з використанням оптичного і растрового електронного микроскопів. На растровому микроскопі дослідження виконані в зворотнорозсіяних електронах. Механічні властивості досліджені на круглих зразках в поздовжньому і поперечному напрямках при розтягуванні відповідно до ГОСТ 1497-84. Також заміряли твердість по Брінеллю і Роквеллу в поздовжньому і поперечному напрямках по товщині стінки. **Результати.** Отримано дані про формування структури і механічних властивостей при пресуванні труб зі сплаву Ti-3Al-2.5V. В пресованих трубах має місце анизотропія механічних властивостей, неоднорідність структури, пов'язані з температурно-деформаційними параметрами процесу та, ймовірно, зі спадковістю після кування злитка. **Наукова новизна.**

Встановлено закономірності формування структури та властивостей труб зі сплаву Ti-3Al-2.5V в процесі пресування. Показано розвиток при пресуванні процесів динамічної рекристалізації та формування неоднорідних, різнозернистих структур, анізотропії властивостей. **Практична значимість.** На підставі отриманих результатів рекомендовані температурно-деформаційні режими гарячого пресування для виробництва труб в промислових умовах.

Ключові слова: сплав титану Ti-3Al-2.5V, мікроструктура, механічні властивості, пресування

FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES IN PRESSING Ti-3Al-2.5V TITANIUM ALLOY TUBES

VAHRUSHEVA V. S. ¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

HRYZIN N. V. ², *assistant, jun. res.*

ЛИХОПЕК Р. А., *senior teacher*

¹ department of Materials Science and Treatment of Materials, State Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +380676324532, e-mail: v.vahrusheva@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

² department of Materials Science and Treatment of Materials, State Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-7589-6548

³ Dnipropetrovsk national University of railway transport, str. Academician Lazaryan, 2, Dnepr, Ukraine

Abstract. Ti-3Al-2.5V titanium alloy pipes are used in the hydraulic systems of the airplanes of Boeing, Airbus and other leading companies and require high performance properties, therefore the role of technological processes of their manufacture is increasing. Pressing as one of the stages of manufacturing pipes made of titanium is considered in this paper. **Objective.** To determination of the characteristics of the formation of the structure and mechanical properties of Ti-3Al-2.5V alloy pipes at the pressing stage. **Methods of research.** The microstructure of metal with the use of optical and scanning electron microscopes is studied. The investigations are performed in backscattered electrons by means of scanning microscope. The mechanical properties have been studied on circular specimens in the longitudinal and transverse directions under tension in accordance with ГОСТ 1497-84. The Brinell and Rockwell hardness was also measured in the longitudinal and transverse directions in thickness. **Results.** The data on the formation of structure and mechanical properties for the extrusion of Ti-3Al-2.5V alloy pipes are obtained. Anisotropy of mechanical properties, heterogeneity of the structure associated with the temperature-deformation parameters of the process and, probably, with heredity after forging in the extruded tubes are observed. **Scientific novelty.** Regularities in the formation of the structure and properties of Ti-3Al-2.5V alloy pipes during the pressing process are defined. The development of the processes of dynamic recrystallization and the formation of heterogeneous, variegated structures and the anisotropy of properties are shown during pressing. **Practical value.** Based on the results obtained, temperature-deformed hot pressing modes are recommended for the production of pipes in industrial conditions.

Key words: titanium alloy Ti-3Al-2.5V, microstructure, mechanical properties, pressing

Введение

Трубы из сплава титана Ti-3Al-2.5V широко используется в гидросистемах современных самолетов ведущих мировых фирм, занимающихся самолетостроением «Боинг», Аэробус и др. Трубы эксплуатируются в сложных условиях и поэтому требования к качеству труб предъявляются довольно жесткие. Требуется повышенная прочность, высокая усталостная прочность, высокие технологические свойства и др. В связи с этим, особое внимание уделяется технологическому процессу их изготовления и получения требуемых свойств. Традиционно технология изготовления труб предусматривает вакуумную выплавку сплава, ковку, прессование и серию холодных прокаток с промежуточными вакуумными отжигами либо другими видами термической обработки. Важным этапом

технологического процесса является прессование, т.к. структура, свойства и текстура, сформированная на этой стадии технологического процесса наследуется на последующих стадиях деформации.

Цель

Целью работы является установление особенностей формирования структуры и механических свойств труб из сплава Ti-3Al-2.5V на стадии прессования.

Материал и методика исследования.

Материалом для исследования являются трубы из сплава Ti-3Al-2.5V, химический состав которого представлен в таблице №1.

Таблица 1.

Химический состав сплава Ti-3Al-2.5V / the chemical composition of the alloy Ti-3Al-2.5V

Al	C н.б.	F н.б.	H н.б.	N н.б.	O н.б.	V	Ti
2.5-3.5	0.05	0.25	0.013	0.02	0.12	2.0-3.0	все остальное

В работе исследована микроструктура металла с применением оптического и растрового электронного микроскопов. На растровом электронном микроскопе исследования выполнены с использованием обратнорассеянных электронов. Механические свойства исследованы на круглых образцах при растяжении в соответствии с ГОСТ 1497-84. Механические свойства оценивали в продольном и поперечном направлениях, также измеряли твердость по Бринеллю и Роквеллу в продольном и поперечном направлениях.

Результаты исследования и обсуждение.

Исследуемый сплав Ti-3Al-2.5V является псевдо-альфа сплавом. Структура сплава состоит в основном из α -фазы и небольшого (до 5%) количества бета – фазы.

Кристаллическая решетка сплава – гексагональная плотноупакованная (ГПУ). Как известно, титан имеет полиморфное превращение. Высокотемпературная β -модификация устойчивая от 882°C, имеет объемно-центрированную кубическую решетку.

Скольжение в титане протекает преимущественно по призматическим плоскостям $\{10\bar{1}0\}$ и в меньшей степени по пирамидальным $\{10\bar{1}0\}$ и плоскости базиса (0001). Скольжение во всех случаях происходит в направлении наибольшей плотной упаковки атомов $\langle 11\bar{2}0 \rangle$.

Помимо этого, пластическая деформация в титане осуществляется путем двойникования по плоскостям $\{10\bar{1}2\}$; $\{11\bar{2}1\}$; $\{1\bar{1}22\}$; $\{11\bar{2}3\}$ и $\{11\bar{2}4\}$. В отличие от других металлов с ГПУ решеткой в титане может происходить поперечное скольжение по тем же самым плоскостям, что и первичное скольжение $\{10\bar{1}0\}$.

В β -титане механизм скольжения такой же, как и в других металлах с ОЦК решеткой. Скольжение протекает по плоскостям $\{110\}$ и $\{112\}$ в направлении наибольшей плотности упаковки $\langle 111 \rangle$.

Особенности скольжения в металлах с ГПУ решеткой зачастую приводят к созданию сильной предпочтительной ориентации кристаллов или формируют текстуру, что в свою очередь влияет на уровень механических свойств металла в различных направлениях, т.е. возникает анизотропия свойств [1].

В данной работе исследовали структуру и свойства труб на переделе после горячего прессования. Прессование, как правило, осуществляется на горизонтальных прессах различной мощности. Изготовители прессованных заготовок используют разные режимы температурно-деформированной обработки сплава. Прессование производят в β -области либо $\alpha+\beta$ при температуре 680-980°C в зависимости от планируемой степени обжатия и мощности пресса. Скорость деформации является важной составляющей. При более низких скоростях формируется более равномерная структура по всей длине прессованной трубы.

Известно, что титан имеет низкую теплопроводность при нагреве. Вследствие этого, в заготовке образуется перепад температур, который может быть причиной увеличения неравномерностей течения металла [2].

В работе исследовали прессованные трубы размерами 80÷86x20÷27 мм, изготовленные различными производителями. На рис.1 представлены фотографии микроструктуры труб в образце от производителя №1 (а, б) и производителя №2 (в, г).

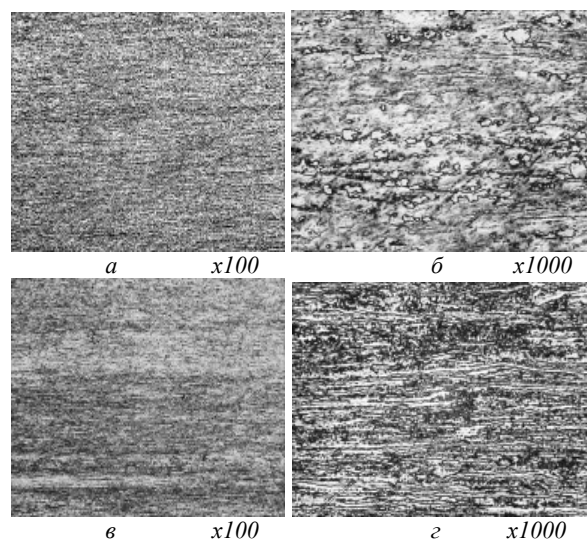


Рис. 1. Микроструктура горячепрессованных труб двух производителей (а, б – производитель №1; в, г – производитель №2) / Microstructure of hot-pressed pipes of two manufacturers (a, b - producer No.1, g - producer No. 2)

Как видно структура труб мелкозернистая, зерно 10-11 номера. Наблюдается полосчатость по толщине стенки. В образце от первого производителя структура более неоднородна, наблюдается разнотекстурность. Вероятно, прессование проходило при более высоких температурах, что способствует развитию процессов динамической рекристаллизации. В структуре видны отдельные рекристаллизованные зерна α -фазы имеющие размеры до 20 мкм.

В то же время у второго производителя структура прессованных труб имеет вытянутые

зерна α -фазы, рекристаллизация протекает в меньшей степени.

Исследование с использованием растровой электронной микроскопии в контрасте обратнорассеянных электронов (ОР) (рис.2), показало, что микроструктура центральных областей трубы представлена преимущественно деформированными зернами α -фазы, о чем говорит плавное изменение контраста ОР электронов в теле зерна. В большинстве зерен α -фазы просматриваются участки с мелкой субзеренной структурой, с размерами субзерен около 2-5 мкм (рис.2 б - темные стрелки), кроме того, в структуре присутствуют крупные рекристаллизованные зерна, размерами до 20 мкм (рис. 2 а). Мелкие субзерна и рекристаллизованные зерна α -фазы имеют однородный контраст в теле зерна. Деформированные зерна α -фазы вытянуты вдоль направления прокатки. β -прослойки, располагаются в виде раздробленных строчек вдоль зерен α -фазы (рис. 2 б).

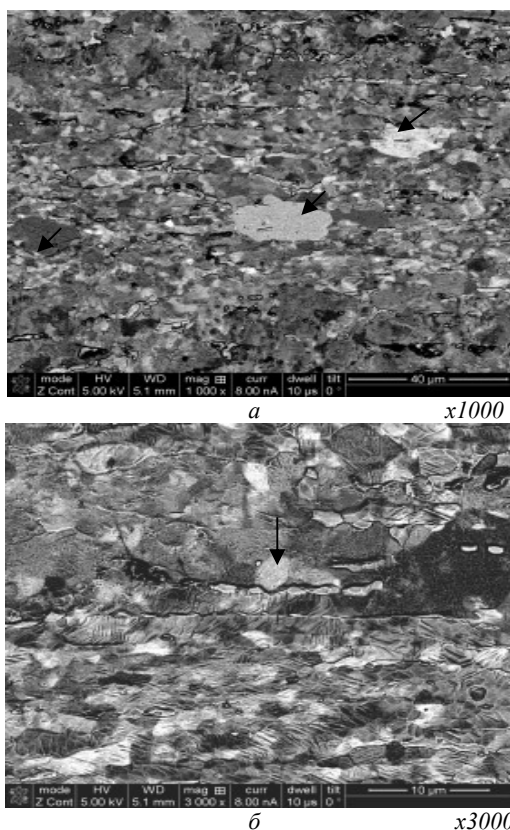


Рис. 2. Микроструктура образца от трубы $\varnothing 80 \times 25$ первого производителя (в контрасте обратнорассеянных электронов) / The microstructure of the sample from the $\varnothing 80 \times 25$ pipe of the first manufacturer (in contrast to the backscattered electrons)

Структура ближе к внутренним слоям трубы имеет меньшее количество участков с крупными рекристаллизованными β -зернами, имеющими однородный контраст по сечению, и больше

деформированных α -зерен с плавным контрастом (рис.3).

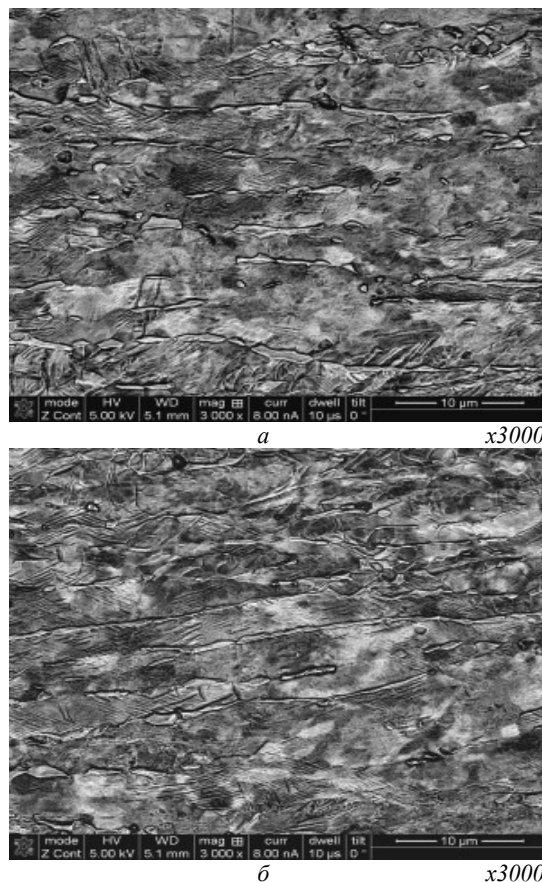


Рис. 3. Микроструктура в периферийных областях образца от трубы $\varnothing 80 \times 25$ первого производителя (в контрасте обратнорассеянных электронов) / The microstructure in the peripheral regions of the sample from the $\varnothing 80 \times 25$ pipe of the first producer (in contrast to the backscattered electrons)

Известно, что комплекс механических и физических свойств титановых псевдо α -сплавов зависит от их структурно-текстурного состояния, формирующегося, главным образом, при горячей пластической деформации [3, 4].

Как следует из представленных фотографий микроструктуры структура неоднородна и состоит из фрагментов параллельных грубых пластин α -фазы раздельных прослойками частично распавшейся β -фазы.

При деформации труб в интервале температур 700-850 $^{\circ}$ C в структуре сплава возникает большое количество двойников, пересекающих как α -пластины, так и целые фрагменты. Количество двойников тем больше, чем выше скорость деформации (рис.2 б). Кроме того, наблюдается дробление α -пластин с образованием новых полиэдрических α -зерен.

Чем выше температура деформации, тем меньше образуется двойников и происходит сфероидизация пластин α -фазы [5].

Исследование механических свойств горячепрессованных труб обоих производителей в продольном и поперечном направлениях показало, что имеется анизотропия свойств. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Механические свойства горячепрессованных труб различных производителей / Mechanical properties of hot-pressed pipes of different manufacturers

Состояние	№ образца	Продольное направление			Поперечное направление		
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Горячепрессованные трубы размеры 80x20мм (первый производитель)	1	750-752	608-610	20	740-742	590-600	21
Горячепрессованные трубы Размер 86x21 мм (второй производитель)	2	760-770	654-660	18	750-760	650	18,5

Как следует из представленных данных, более высокие значения прочностных характеристик наблюдается в продольном направлении.

Более высокий уровень механических свойств имеет трубы поставщика №2, что подтверждается и исследованиями микроструктуры. Весьма направленная структура вносит свой вклад в наблюдаемую анизотропию механических свойств труб. Анизотропия свойств во многом обусловлена особенностями пластической деформации металлов с ГПУ решеткой.

Измерение твердости по толщине стенки в продольном направлении показало, что у поверхности с внутренней стороны трубы твердость выше $H_v = 243$, середина $H_v = 230$. Это согласуется с данными исследования микроструктуры металла первого производителя заготовки. У второго производителя процесс прессования проходил при более низкой температуре в $\alpha+\beta$ области и более низкой скорости деформации. При этом механические свойства и твердость выше: для первого производителя 24 HRC, а для второго – 28 HRC.

В работе исследовано влияние скорости охлаждения при прессовании труб – охлаждение на воздухе и закалка в воду. Если охлаждение на

воздухе приводит к формированию структуры α -фазы титана с метастабильной β -фазой, то увеличение скорости охлаждения приводит к образованию гексагональной структуры мартенсита. Такая заготовка требует обязательно последующей термической обработки, а именно рекристаллизационного отжига, в вакууме.

Заключение

Исследование структуры и свойств горячепрессованных труб из сплава Ti-3Al-2.5V двух различных производителей, показало, что в процессе горячего прессования формируется мелкозернистая структура (10-11 номера), представляющая α -зерна и прослойки β -фазы. В структуре имеется разнотернистость, встречаются зерна до 20 мкм, в основном в середине стенки труб, в металле первого производителя труб, что свидетельствует о развитии процессов динамической рекристаллизации, проходящей при более высоких температурах прессования.

Структура неоднородная по сечению трубы. В прессованных трубах присутствует неоднородность в структуре и свойствах по толщине стенки. У внутренней поверхности твердость выше. Более развиты процессы рекристаллизации, а, следовательно, выше температура в центральной части трубы. Внутренняя поверхность, судя по структуре, имеет более низкую температуру, т.к. зерна, в основном, деформированные. Для получения более однородной структуры при прессовании труб желательно снижение температуры и скорости деформации.

Определены стандартные механические свойства горячепрессованных труб. Исследования механических свойств труб в продольном и поперечном направлении показало анизотропию свойств прессованных труб. В продольном направлении механические свойства выше, чем в поперечном. Наличие анизотропии подтверждено измерениями твердости по Бринеллю и Роквеллу.

На стадии горячего прессования возникшая анизотропия свойств и структурная неоднородность может наследоваться при дальнейших технологических переделах. Поскольку готовые трубы, в соответствии с требованиями нормативной документации, должны иметь определенную структуру, текстуру, обеспечивающую механические, технологические свойства, коэффициент относительного сжатия и др., то важным является знание структурно-текстурного состояния на стадии прессования, и его трансформация на следующих стадиях технологического передела, что будет исследовано в дальнейшем.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – Москва МИСиС, 1999. – 413 с.
2. Forney C. E., Shemel H. S., Ti-3Al-2.5V seamless tubing engineering guide. Washington, 1987. 115 p.
3. Логинов Ю.Н., Котов В.В., Смирнов В.Т. Исследование свойств титанового сплава Ti-3Al-2.5V с оценкой склонности к текстурообразованию. В сб. тр. межд. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» СПб, 2005. С. 281-284.
4. Вахрушева В. С., Грузин Н. В. Дослідження впливу початкової текстури заготовки на текстуру готових труб зі сплаву титану Ti-3Al-2.5V. // Металознавство та термічна обробка металів – 2015. - №3-С. 16-20.
5. Ушков С. С., Копылов В. Н., Разуваева И. Н. Научные аспекты выбора регламентированного структурно-текстурного состояния «морских» сплавов титана. // Металловедение и термическая обработка металлов – 1999. №9.– С. 38-51.

REFERENCE

1. Kolachev B. A., Elagin V. I., Livanov V. A. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnih metallov i spлавov. – Moscow MISiS, 1999. – 413p.
2. Forney C. E., Shemel H. S., Ti-3Al-2.5V seamless tubing engineering guide. Washington, 1987. 115 p.
3. Loginov U. N., Kotov V. V., Smirnov V.T. Issledovanie svoistv titanovogo splava Ti-3Al-2.5V s ocenкой sklonnosti k tekstyroobrazovanija. V sb. Tr. Megd. Konf. “Sovremennie dostigeniya v teorii i technologii plasticheskoy obrabotki metallov” SPb, 2005. P. 281-284.
4. Vahrusheva V. S., Hryzin N. V. Doslidgennia vplivu pochatkovoij teksteru zagotovki na teksturu gotovih trub zi splavy titana Ti-3Al-2.5V. // Mealloznavstvo ta termichna obrobka metalliv – 2015/ - №3 - P. 16-20.
5. Ushkov S. S., Kopilov V. N., Razyvaeva I. N. Nauchnie aspkti vibora reglamentirovannogo stryktyrno-tekstyrnogo sostojanija „morskih“ spлавov titana. // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov – 1999. №9 – P. 38-51.

Статья рекомендована к публикации: д-ром. техн. наук., проф. Большаковым В. И. (Украина) и д-ром техн. наук., проф. Лаухиным Д. В. (Украина).