

PACS numbers: 61.66.Dk, 62.20.F-, 68.55.jm, 81.20.Wk, 81.40.Ef, 81.40.Lm

Влияние степени деформации при холодной прокатке труб из сплава титана на формирование текстуры и свойств

В. С. Вахрушева, Н. В. Грузин

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
ул. Чернышевского, 24а,
49600 Днепр, Украина*

Рассмотрены процессы формирования текстуры, структуры и свойств при изготовлении труб из сплава титана Ti–3Al–2,5V. При изготовлении труб на стадии холодной прокатки общая степень деформации в проходах и соотношение деформации по стенке и диаметру оказывают наиболее значительное влияние на формирование текстуры и свойств. Определены условия создания в металле труб максимального количества радиальной текстуры, что обеспечивает повышение эксплуатационных свойств изделий.

Ключевые слова: сплав титана, свойства, текстура, деформация, трубы, технология.

Розглянуто процеси формування структури, властивостей і текстури при виготовленні труб зі стопу титану Ti–3Al–2,5V. При виготовленні труб на стадії холодної прокатки загальний ступінь деформації в проходах і співвідношення деформації по стінці та діаметру найбільше впливають на формування текстури та властивостей. Визначено умови створення в металі труб максимальної кількості радіальної текстури, що забезпечує підвищення експлуатаційних властивостей виробів.

Ключові слова: стоп титану, властивості, текстура, деформація, труби, технологія.

Corresponding author: Vira Serhiyivna Vakhrusheva
E-mail: vs062@ukr.net

*Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture,
24a Chernyshevsky Str., UA-49600 Dnipro, Ukraine*

Citation: V. S. Vakhrusheva and N. V. Hruzin, Effect of Deformation Ratio on Texture and Properties of Titanium Alloy Tubes under Cold Rolling, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 10: 1303–1314 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.10.1303](https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1303).

The processes of texture, structure and properties formation during Ti–3Al–2.5V titanium alloy tubes producing are considered. As found, a common degree of deformation of tube under the passes and the ratio of wall and diameter deformations have the most significant effect on the formation of the texture and properties at the stage of cold rolling. The conditions for creating the maximum amount of radial texture in metal tubes are determined, which ensures higher performance properties of products.

Key words: titanium alloy, properties, texture, deformation, tubes, technology.

(Получено 24 июля 2018 г.; окончат. вариант — 23 мая 2019 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности все более широкое применение находят трубы из титановых сплавов. Хорошее сочетание характеристик удельной прочности, термостойкости, коррозионной стойкости и технологичности обеспечило их применение в современном самолётостроении, ракетостроении, в частности, в гидравлических системах двигателей самолётов.

Анализ данных литературы [1–3] показывает, что надёжность труб из титана и его сплавов во многом определяется кристаллографической текстурой, формирующейся в трубах в процессе их изготовления. Особое влияние текстура в трубах оказывает на усталостные характеристики, действующие на металл труб в процессе эксплуатации. Для α -сплавов титана эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик элементов конструкций является создание в них заданной анизотропии механических свойств.

Совершенствование технологического процесса изготовления труб из сплавов титана с одной стороны позволяет правильно выбрать режимы деформации металла, а с другой стороны — существенно изменить и добиться требуемых характеристик, важных для потребителей этого вида труб.

Технология изготовления постоянно претерпевает изменения и важно оценить, как влияют отдельные элементы технологии на формирование текстуры, свойств и структуры титановых труб для того, чтобы управлять этим процессом.

Развитие авиационной промышленности и жёсткие требования к гидравлическим трубам заставило ведущие авиастроительные фирмы разработать свои стандарты на трубы из сплавов титана, которые охватывают уникальные требования, предъявляемые к данной продукции. Так в настоящее время разрабатываются стандарты, включающие новые требования. Во многих новых стандартах на продукцию гражданского и военного назначения сейчас указы-

вается требование так называемого «коэффициента деформации сжатия» (CSR), в отечественных стандартах — «коэффициент относительного сжатия» (КОС). Данный коэффициент характеризует кристаллографическую текстуру труб.

Известно [1, 4], что для увеличения усталостного ресурса труб, их технологических характеристик и пластичности, в трубах необходимо сформировать радиальную текстуру. При этом изменяются другие свойства труб, поэтому поставлена важная задача получить требуемый комплекс свойств в процессе их изготовления. Наряду с требованиями по созданию текстуры в нормативную документацию включён целый ряд технологических испытаний таких как испытание на растяжение в продольном направлении, сплющивание, раздача, загиб, испытание внутренним гидравлическим давлением. Кроме того, требуется постоянство результатов в условиях эксплуатационных нагрузок.

Целью настоящей работы является оценка влияния степени деформации в проходах при холодной прокатке и последующей термической обработке труб из сплава титана Ti–3Al–2,5V на формирование текстуры, структуры и свойств.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследования выбран широко применяемый в авиастроении сплав титана Ti–3Al–2,5V. Химический состав представлен в табл. 1.

Исследование выполнено на трубах на стадии холодной пилигримовой прокатки и последующей термической обработки.

Традиционно, в зависимости от размеров исходной заготовки и требуемых размеров готовых труб, осуществляется 2–5 проходов холодной деформации с промежуточными вакуумными отжигами. Для изготовления труб размером $\varnothing 15,8 \times 0,8$ мм и $\varnothing 12,7 \times 0,7$ мм в производство заданы заготовки $\varnothing 50,8 \times 8,3$ мм и $\varnothing 38 \times 5$ мм, соответственно, в состоянии после вакуумного отжига. Трубы прокатаны в три прохода холодной деформации. По мере увеличения количества проходов увеличивается степень деформации в каждом проходе от 40% в первом до 85% в последнем. Ранее трубы прокатывали с бо-

ТАБЛИЦА 1. Химический состав сплава Ti–3Al–2,5V.

TABLE 1. Chemical composition of Ti–3Al–2.5V alloy.

| Содержание химических элементов, % масс. | | | | | | |
|--|---------|-------|--------|--------|--------|----------|
| Al | V | Fe | C | N | O | Ti |
| 2,5–3,5 | 2,0–3,0 | < 0,3 | < 0,05 | < 0,02 | < 0,12 | основной |

лее низкими деформациями за проход — 30–60%. При этом изменено соотношение деформации по толщине стенки и диаметру в каждом проходе. Деформация по диаметру увеличена незначительно, в большей степени изменена деформация по толщине стенки. От прохода к проходу возрастает фактор Q , характеризующий отношение деформации по стенке (ε_s) к деформации по диаметру (ε_d):

$$Q = \varepsilon_s / \varepsilon_d. \quad (1)$$

Значение Q может меняться не только в проходе, но и по длине очага деформации, что тоже может влиять на формирование текстуры. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

В работе исследована структура, механические свойства, текстура металла труб, а также коэффициенты относительного сжатия (КОС) и технологические свойства на каждом переделе — после деформации и термической обработки.

Механические свойства определяли на образцах при растяжении в соответствии с ГОСТ 10006-80. Микроструктуру оценивали с помощью оптического микроскопа Axiovert-40 MAT. Технологические испытания на сплющивание, раздачу, загиб проводили в соответствии с требованиями нормативной документации [8].

Кристаллографическую текстуру изучали методом рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-4 в излучении CuK_α . Записывали полнопрофильную диаграмму 2θ условных изменений интенсивности рентгеновского отражения от внешней поверхности труб (R) и от плоскости продольного сечения (T). Образцы от труб специально подготавливали. Для увеличения площади облучения съёмку проводили на сборных образцах, составленных из нескольких сегментов труб. Для каждой съёмки определяли интенсивности рентгеновских линий и плотность полюсов по методу Харриса–Мориса [5, 6] и рассчитывали текстурные коэффициенты Кернса (f):

$$f = \sum_i A_i P_i \cos^2 \alpha_i, \quad (2)$$

где α_i — угол между осью $[00.1]$ кристаллитов материала и нормалью к поверхности съёмки, A_i — статистический вес соответствующих рефлексов на сферической проекции ($\sum_i A_i = 1$). Далее для каждой линии рассчитывали плотность полюсов P_i .

Сумма параметров Кернса по трём основным геометрическим направлениям для образца (направления съёмки) равна единице. Данный параметр может быть некой долеой (процентной) мерой ориентаций кристаллографических плоскостей относительно данной поверхности, т.е. характеризует радиальную и тангенциальную текстуры [7].

По наборам P_i строили обратные полюсные фигуры (ОПФ) — их

распределение по кристаллографическим ориентациям представлено в стереографических проекциях.

Коэффициент относительного сжатия (КОС) оценивали согласно стандарту AS 4076 и разработанной на его основе методике. КОС определяется как отношение величины окружной деформации к разнице между продольной и окружной деформациями [8].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе изготовления труб каждая из технологических операций существенно влияет на свойства труб. Возможное внесение изменений в технологический процесс может положительно повлиять на одно из свойств, но при этом негативно сказаться на других. Так, для α -титановых сплавов показано, что кристаллографическая анизотропия является ответственной как за повышение (до 30%), так и за снижение (до 20%) конструкционной прочности сферических сосудов внутреннего давления топливных систем космических аппаратов по сравнению с прочностью одноосных образцов. Это так называемый эффект текстурного упрочнения и разупрочнения [9].

В настоящем исследовании одной из задач является установление влияния степени деформации сплава титана в проходе холодной прокатки на текстуру и свойства труб, прокатанных с высокими степенями деформации в проходе — до 75–85%. При этом варьировались различные обжатия по толщине стенки и диаметру, что важно для получения определенных типов текстур.

Титан и его α -сплавы имеют ГПУ-решётку и являются анизотропным материалом, что связано с ограниченным количеством систем скольжения при холодной деформации. Это две системы — плоскости (10.0) — грани призмы и (10.1) — грани пирамиды и общее направление скольжения [11.0]. В других направлениях деформация идёт по механизму двойникования [10].

В работе выполнен довольно большой объём исследований механических свойств при растяжении труб после различных технологических операций. Рассчитаны коэффициенты относительного сжатия. Результаты представлены в табл. 2.

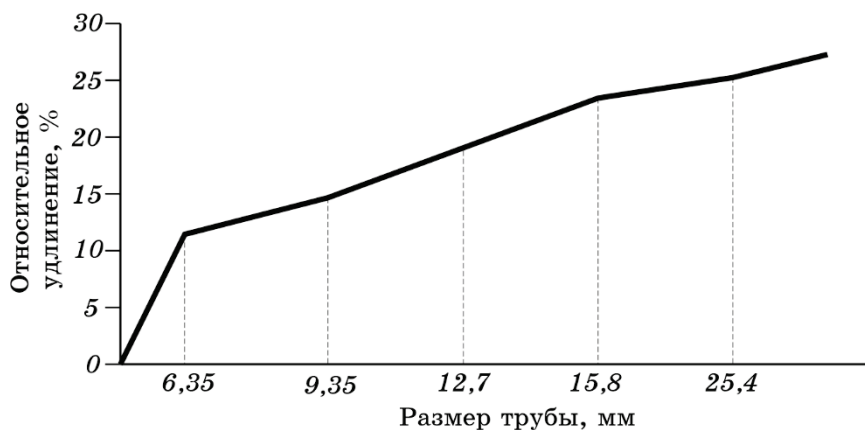
Как следует из таблицы, механические свойства труб изменяются в довольно широких пределах, и регулируя степень деформации и режимы термической обработки, можно получить требуемые для потребителя свойства. Низкие степени деформации 40–50% в проходах не всегда обеспечивают требуемые нормативной документацией значения по уровню механических свойств, особенно по значениям предела текучести и относительного удлинения. При этом трубы имеют низкие значения КОС (0,9–1,2). Увеличение степени деформации в проходах повышает механические свойства и вместе с тем увеличивает значения КОС до уровня 1,6–3,0.

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства и коэффициент относительного сжатия (КОС) труб из сплава титана Ti-3Al-2,5V.**TABLE 2.** Mechanical properties and coefficient of compression strain ratio (КОС) of tubes from titanium alloy Ti-3Al-2.5V.

| Состояние | Механические свойства | | | КОС |
|---|-----------------------|----------------------|--------------|---------|
| | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | |
| Заготовка под холодный передел | 680–720 | 535–563 | 19–23 | – |
| Первый холодный передел | 907–963 | 794–856 | 12–14,4 | 1,2 |
| Готовый размер после деформации | 1033–1034 | 905–912 | 14,6–15 | – |
| Готовый размер после деформации ($\varepsilon = 85\%$) и термической обработки — отжига для снятия напряжений | 970–971 | 830–833 | 19–21 | 1,6–2,5 |
| Среднее значение для готовых труб после деформации ($\varepsilon = 50–60\%$) и термической обработки | 870–970 | 750–790 | 17–25 | 1,3–3,0 |
| Требования нормативной документации | 862–979 | ≥ 724 | ≥ 14 | 1,3–3,5 |

Исследования показали, что размер труб влияет на их механические свойства, особенно на относительное удлинение. С уменьшением размера труб уменьшается и относительное удлинение (рис. 1). Вероятно, с увеличением количества проходов и степени деформации формируется более острая текстура (в основном радиальная) и текстурное упрочнение сказывается на относительном удлинении.

В прокатанных по указанным режимам трубах кроме механиче-

**Рис. 1.** Влияние размера труб на относительное удлинение.**Fig. 1.** The effect of tubes size on the elongation.

ских свойств исследовали структуру, текстуру, коэффициент относительного сжатия (КОС) и технологические характеристики — раздачу, сплющивание, загиб.

На рисунке 2 представлена зависимость изменения коэффициента относительного сжатия от значений относительного удлинения труб. Как следует из рис. 2, чем меньше относительное удлинение, тем ниже коэффициент относительного сжатия.

Микроструктура в готовых трубах сохраняет структуру деформированного металла и является мелкозернистой. Структура состоит преимущественно из зерен α -фазы титана и небольшого количества β -фазы (рис. 3).

Исследование текстуры труб показало, что при прокатке труб формируется текстура двух типов: радиальная и тангенциальная. Радиальная текстура характеризуется тем, что базисные плоскости лежат перпендикулярно поверхности трубы, для тангенциальной текстуры базисные плоскости параллельны поверхности трубы.

Одним из основных физических процессов, вызывающих формирование кристаллографической текстуры, является пластическая деформация. Образование текстуры при пластической деформации является следствием поворота кристаллографических плоскостей в процессах скольжения и двойникования. Механизм и закономерности текстурообразования поликристаллических материалов достаточно подробно описаны в работах [11, 12]. При этом необходимо отметить, что в процессе деформации перераспределение текстурных максимумов различно для различных металлов. Так для титана увеличение степени деформации приводит к уменьшению рассе-

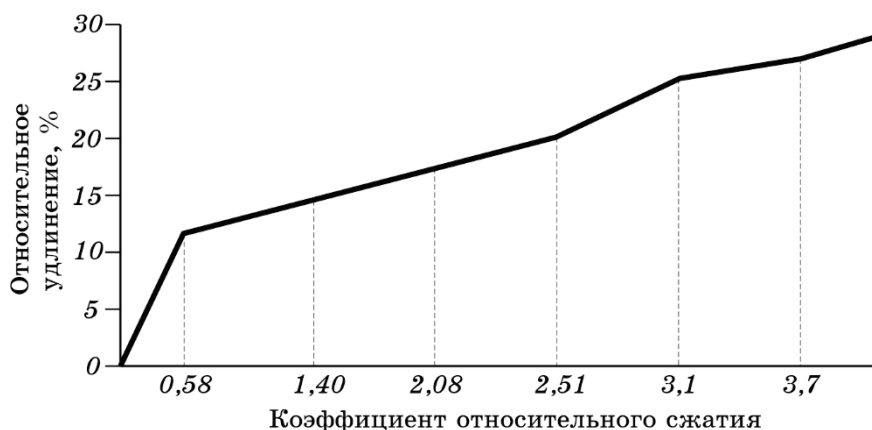


Рис. 2. Зависимость коэффициент относительного сжатия от относительного удлинения.

Fig. 2. Dependence of coefficient compression strain ratio on the elongation.



Рис. 3. Микроструктура готовой трубы размером $\varnothing 15,8 \times 0,8$ мм из сплава Ti-3Al-2,5V после деформации и термообработки ($\times 1000$).

Fig. 3. Microstructure of the $\varnothing 15.8 \times 0.8$ mm finished tube from Ti-3Al-2.5V alloy after deformation and heat treatment ($\times 1000$).

яния текстуры и угла наклона текстурного максимума относительно направления нормали к плоскости основной деформации.

В трубах схема напряжённого состояния при прокатке довольно сложная. Деформация осуществляется по диаметру и стенке с одновременным поворотом и подачей трубы. В зависимости от преимущественной деформации по стенке либо по диаметру формируются различные типы текстур. В связи с этим в проводимом эксперименте с учётом требований по наличию преимущественно радиальной текстуры изменены степени деформации и увеличена деформация как общая, так и по толщине стенки. Общая степень деформации возрастает до 85%, а коэффициент Q до 2,5–3.

Увеличение степени деформации в проходе до 85% обеспечивает получение требуемых в соответствии с нормативной документацией свойств: механических, технологических (раздача, сплющивание, загиб) и важного показателя коэффициента относительного сжатия.

В работе исследована текстура образцов от труб, прокатанных с высокими деформациями на стадии холодной прокатки — до 85% и после термической обработки — отжига для снятия напряжений при температуре ниже 500°C.

С этой целью выполнена рентгеновская съёмка полной дифрактограммы образцов в двух направлениях: радиальном и тангенциальном. Посчитаны распределения плотности полюсов P_{hkl} и параметры Кернса (f), характеризующие наличие радиальной и тангенциальной текстуры.

В таблице 3 представлены распределение плотности полюсов P_{hkl} и значений текстурного параметра Кернса (f) для радиального (1R, 2R) и тангенциального (1T, 2T) направлений образцов труб после

ТАБЛИЦА 3. Распределение плотности полюсов P_{hkl} и значений текстурного параметра Кернса (f) для исследованных термообработанных и деформированных образцов труб.

TABLE 3. Distribution of P_{hkl} poles density and Kerns textural parameter values (f) for heat-treated and deformed tube samples.

| (hkl) | 1R | 1T | 2R | 2T |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 10,0 | 0,04 | 1,29 | 0,02 | 1,18 |
| 0,02 | 4,90 | 0,97 | 4,88 | 0,70 |
| 10,1 | 0,16 | 1,03 | 0,17 | 0,96 |
| 10,2 | 0,75 | 0,89 | 0,71 | 0,86 |
| 11,0 | 0,32 | 1,58 | 0,32 | 1,62 |
| 10,3 | 2,25 | 0,76 | 2,29 | 0,69 |
| 11,2 | 0,63 | 1,16 | 0,61 | 1,14 |
| 20,1 | 0,05 | 1,08 | 0,06 | 0,97 |
| 10,4 | 3,41 | 0,85 | 3,37 | 0,55 |
| 20,3 | 0,26 | 0,81 | 0,29 | 0,76 |
| 21,0 | 0,10 | 1,28 | 0,17 | 1,61 |
| 21,1 | 0,13 | 1,16 | 0,20 | 1,34 |
| 11,4 | 1,66 | 0,84 | 1,75 | 0,95 |
| 21,2 | 0,37 | 1,02 | 0,19 | 0,95 |
| 10,5 | 4,62 | 0,66 | 4,77 | 0,70 |
| 21,3 | 0,49 | 1,04 | 0,41 | 0,98 |
| 30,2 | 0,16 | 0,82 | 0,10 | 0,79 |
| f | 0,689 | 0,284 | 0,697 | 0,270 |

деформации и (2R, 2T) и после термической обработки (1R, 1T).

На основании полученных результатов построены обратные полюсные фигуры (рис. 4).

Как следует из представленных результатов, в образцах, прока-

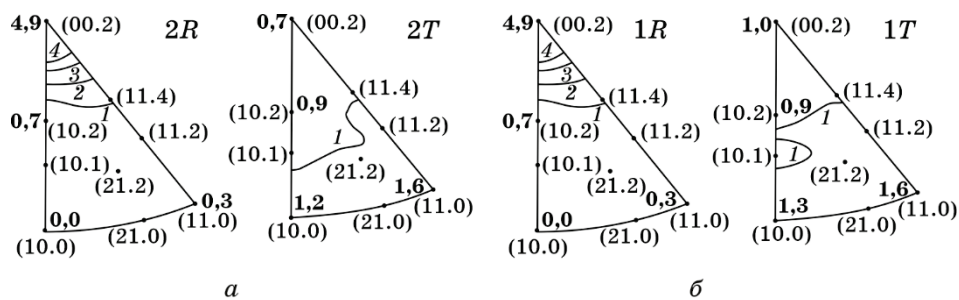


Рис. 4. Обратные полюсные фигуры исследованных образцов труб после деформации (2R и 2T) и термообработки (1R и 1T).

Fig. 4. Inverse pole figures of the investigated tube samples after deformation (2R and 2T) and heat treatment (1R and 1T).

танных с высокой степенью деформации, имеет место сильно выраженная текстура (00.2) в радиальном направлении. Параметры Кернса f_r в данном случае означают 69–70% наклона базисных плоскостей к нормали поверхности съёмки. Имеются данные, например, для циркония, гафния — металлов с ГПУ-решётками, прокатками, возможно, максимально достичь 75% радиальной составляющей текстуры [13].

Ранее выполненное исследование текстуры при прокатке труб с деформациями (40–60%) показало, что уровень радиальной текстуры не превышает 45–49% [14], при этом зачастую не выполнялись требования по КОС (он был на уровне 1–1,2, а также некоторые трубы не выдерживали испытания на раздачу и загиб).

Увеличение общей степени деформации и деформации по стенке благоприятно сказывается на показателях КОС (GRS), что связано, как подтвердили исследования, с формированием большего количества радиальной текстуры в трубах.

Определение коэффициента относительного сжатия КОС в случае прокатки с большими степенями деформациями показало значения 1,8–2,4. При этом все трубы, прокатанные по указанным выше режимам, выдержали технологические испытания на раздачу, на загиб и сплющивание.

После каждого прохода холодной деформации трубы подвергаются рекристаллизационному отжигу, а на готовом размере отжигу для снятия напряжений. Одной из задач, которая решалась в процессе исследований, было определение того, как различные режимы термической обработки влияют на изменение текстуры и свойств. Исследования показали, что увеличение степени деформации в проходах на промежуточных размерах требует некоторого увеличения температуры рекристаллизационного отжига на 30–50°C в зависимости от степени деформации. Это обусловлено тем, что необходимо сохранить с одной стороны мелкое зерно, а с другой стороны сформировать свойства для последующего передела труб с увеличенной степенью деформации. На готовом размере режимы термической обработки также могут быть скорректированы для получения требуемого уровня механических свойств и КОС.

Важным результатом исследования является то, что проведенная после деформации термическая обработка для снятия напряжений при температуре ниже температуры рекристаллизации практически не изменяет текстуры деформации, сохраняя преимущественно радиальную текстуру.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе изготовления труб из титанового сплава Ti–3Al–2,5V для получения требуемого комплекса свойств — преимущественно

радиальной текстуры, высоких механических и технологических характеристик важным является правильный выбор режимов деформации в проходах. На последних проходах холодной прокатки следует увеличивать общую степень деформации до 80–85% и преимущественную деформацию по толщине стенки. Коэффициент Q должен быть не менее 2,5–3. При этом увеличивается количество радиальной текстуры до 65–70%, что обеспечивает требуемый уровень свойств как механических, так и коэффициента относительного сжатия, а также технологических свойств (раздача, сплющивание, загиб).

Как показали исследования, оптимальным коэффициентом относительного сжатия является коэффициент 1,5–2,5. При более высоких его значениях ряд труб не выдерживает технологических испытаний. Термическая обработка готовых труб после холодной деформации (отжиг для снятия напряжений) при температуре ниже температуры рекристаллизации существенно не изменяет структуры и текстуры металла труб, полученной при деформации холодной прокаткой.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. S. Moredith and J. Schemel, *Journal of Testing and Evaluation*, **18**, Iss. 2: 98 (1990).
2. C. E. Forney and N. S. Shemel, *Ti–3Al–2.5V Seamless Tubing Engineering Guide* (Washington, USA: 1987).
3. Ю. Н. Логинов, В. В. Котов, В. Т. Смирнов, *Сб. тр. межд. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов»* (Санкт-Петербург: 2005), с. 281.
4. Ф. С. Займовский, А. В. Никулина, Н. Г. Решетников, *Циркониевые сплавы в атомной энергетике* (Москва: Энергоиздат: 1981).
5. G. B. Harris, *Philos. Mag.*, **43**, Iss. 336: 113 (1952).
6. P. R. Morris, *J. Appl. Phys.*, **30**, Iss. 4: 595 (1959).
7. J. J. Kearns, *Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy* (Pittsburgh, PA, USA: Bettis Atomic Power Lab.: 1965).
8. SAE AS 4076, *SAE Int. 'Contractile Strain Ratio testing of Titanium Hydraulic Tubing'* (1987).
9. Б. А. Колачев, С. Я. Бецофен, Л. А. Бунин, В. А. Володин, *Физико-механические свойства легких конструкционных сплавов* (Москва: Металлургия: 1995).
10. Б. А. Колачев, *Физическое металловедение титана* (Москва: Металлургия: 1976).
11. А. А. Бабареко, *Итоги науки и техники. Серия «Металловедение и термическая обработка»*, **13**: 79 (1980).
12. Е. Б. Рубина, С. Я. Бецофен, *Физ. мет. металловед.*, № 4: 191 (1990).
13. К. В. Ковтун, Г. П. Ковтун, Д. Г. Малыгин и др., *Труды XIX Междуна. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (6–11 сентября, 2010, Алушта)* (НАН Украины: ННЦ «Харьк. физ.-техн. ин-т», НАЭК «Энергоатом»: 2010), с. 174.

14. В. С. Вахрушева, Н. В. Грузин, *Металознавство та термічна обробка металів*, № 3: 16 (2015).

REFERENCES

1. S. Moredith and J. Schemel, *Journal of Testing and Evaluation*, **18**, Iss. 2: 98 (1990).
2. C. E. Forney and N. S. Shemel, *Ti-3Al-2.5V Seamless Tubing Engineering Guide* (Washington: 1987).
3. Yu. N. Loginov, V. V. Kotov, and V. T. Smirnov, *Collect. Proc. Int. Conf. 'Sovremennye Dostizheniya v Teorii i Tekhnologii Plasticheskoy Obrabotki Metallov'* (Saint Petersburg: 2005), p. 281 (in Russian).
4. F. S. Zaimovskiy, A. V. Nikulina, and N. G. Reshetnikov, *Zirconievye Splavy v Atomnoy Energetike* [Zirconium Alloys in Nuclear Power Engineering] (Moscow: Energoizdat: 1981) (in Russian).
5. G. B. Harris, *Philos. Mag.*, **43**, Iss. 336: 113 (1952).
6. P. R. Morris, *J. Appl. Phys.*, **30**, Iss. 4: 595 (1959).
7. J. J. Kearns, *Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy* (Pittsburgh, PA, USA: Bettis Atomic Power Lab.: 1965).
8. SAE AS 4076, *SAE Int. 'Contractile Strain Ratio Testing of Titanium Hydraulic Tubing'* (1987).
9. B. A. Kolachyev, S. Ya. Betsofen, L. A. Bunin, and V. A. Volodin, *Fiziko-Mekhanicheskie Svoystva Legkikh Konstruktsionnykh Splavov* (Moscow: Metallurgiya: 1995) (in Russian).
10. B. A. Kolachev, *Fizicheskoe Metallovedenie Titana* (Moscow: Metallurgiya: 1976) (in Russian).
11. A. A. Babareko, *Itogi Nauki i Tekhniki. Seriya 'Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka'*, **13**: 79 (1980) (in Russian).
12. E. B. Rubina and S. Ya. Betsofen, *Fiz. Met. Metalloved.*, No. 4: 191 (1990) (in Russian).
13. K. V. Kovtun, G. P. Kovtun, D. G. Malyhin et al., *Abstr. XIX Int. Conf. in Physics of Radiation Phenomena and Radiation Materials Science (Sept. 6-11, 2010, Alushta)* (N.A.S. of Ukraine: NNTs 'Kharkov Fiz.-Tekhn. Inst.' and NAEK 'Energoatom': 2010), p. 174 (in Russian).
14. V. S. Vahrusheva and N. V. Hruzin, *Metaloznnavstvo ta Termichna Obrobka Metaliv*, No. 3: 16 (2015) (in Ukrainian).