

## Вплив структури на демпфівальну здатність технічно чистого титану VT1-0

Д. В. Ткач<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063

**Article info:**

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

15 November 2014

22 December 2014

08 January 2015

**Correspondent Author's Address:**<sup>1)</sup> \_odarka@mail.ru

У роботі проведена оцінка впливу інтенсивної пластичної деформації на демпфівальні властивості титану VT1-0. Було досліджено зразки у вихідному (литому) стані, отримані гвинтовою екструзією та відпалені. Установлено, що найвищі демпфівальні властивості має титан у литому стані. Відпалення литих зразків призводить до різкого зниження рівня розсіювання енергії (у 2, 4 раза). Субмікроструктурні зразки титану VT1-0 після гвинтової екструзії мають менший логарифмічний декремент коливань порівняно з литими зразками. Проте субмікроструктурні зразки відзначаються більш кращою здатністю згасання коливань по відношенню до відпалених зразків (у 1,73 раза вище за відпалений зразок).

**Ключові слова:** технічно чистий титан, гвинтова екструзія, лита структура, відпалений стан, демпфівальна здатність, логарифмічний декремент коливань, розсіювання.

**1. ВСТУП**

Зростаючи з кожним роком кількість деструктивних захворювань суглобів призводить до збільшення потреби виконання операцій ендопротезування. У ряді випадків це ефективний і часто єдиний засіб відновлення втраченої функції кінцівки [1, 2]. При цьому актуальним залишається забезпечення функціонування ендопротеза з точки зору опору конструкції зовнішнім навантаженням та впливу біологічного середовища. Використання технічно чистого титану є доцільним, проте його характеристики міцності та циклічної витривалості недостатні для виготовлення ендопротезів. Тому для підвищення експлуатаційної надійності титану необхідно знаходити шляхи керування мікроструктурою з метою досягнення бажаних властивостей без використання легувальних елементів.

Одним із перспективних напрямів підвищення експлуатаційних властивостей виробів із титану VT1-0 є формування нано- або субмікроструктурної (СМК) структури, яка дозволяє значно покращити низку фізико-механічних властивостей матеріалу за рахунок утворення значної кількості зерен субмікротанокристалічного розміру з великокутовим розорієнтуванням поверхонь поділу. Для отримання такої структури використовують різні методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД), зокрема гвинтову екструзію. Це забезпечує зростання експлуатаційних властивостей титану і сплавів на його основі порівняно з рівноважним станом [3, 4, 5].

Ендопротези працюють в умовах постійно діючих навантажень різного роду: це можуть бути як статичні, так і динамічні навантаження, у процесі

діяльності людини суглоби можуть періодично піддаватись ударним та вібраційним навантаженням. Тому вважають, що матеріали, які застосовують для виготовлення імплантатів, повинні забезпечувати як статичну міцність, так і опір конструкції змінним навантаженням [6, 7]. В умовах впливу на конструкцію періодичних навантажень існує небезпека виникнення в ній резонансних коливань та високої динамічної напруженості, а в подальшому і можливого руйнування.

Отже, для зменшення динамічної напруженості в конструкції необхідно використовувати матеріали з високою демпфівальною здатністю, які ефективно гасять коливання (як вільні, так і резонансні). Зниження амплітуди коливань з часом пов'язується із розсіюванням пружних хвиль внаслідок непружного опору середовища, на який витрачається енергія коливної системи, що приводить до реалізації явища внутрішнього тертя в металах та сплавах [8]. Згасання коливань у результаті внутрішнього тертя обумовлене перетворенням механічної енергії в теплову. Характер поведінки цієї величини визначається особливостями будови меж зерен, розподілом дефектів кристалічної будови, впливом температури та деформації [8–11]. Високі значення внутрішнього тертя приводять до швидкого згасання вільних коливань виробу та зниженню амплітуд його змущених коливань у резонансному режимі. Вирівнювання динамічних напружень у місцях їх концентрації також відбувається за рахунок цього явища, що, у свою чергу, сприяє збільшенню межі витривалості, оскільки тріщини втомленості утворюються пізніше [12].

Аналіз літературних даних дозволив встановити, що на сьогодні досить добре досліджена демпфірувальна здатність титану та його сплавів у стані стандартного постачання (крупнозернисті) [13, 14, 15]. Вплив нано- та субмікроструктурної структури на механічні властивості металів та сплавів досліджений досить добре [16], проте дисипативні властивості практично не визначені [17, 18]. Крім того, більшість з проведених експериментів визначали дисипативні властивості наноструктурованих покриттів [12, 18, 19], а об'ємні субмікроструктурні матеріали (в тому числі і титан) повною мірою не розглядалися.

Отже, вплив субмікроструктурної структури, отриманої інтенсивною пластичною деформацією методом гвинтової екструзії, на демпфірувальну здатність технічно чистого титану практично не досліджений. Тому метою роботи було оцінити вплив структури технічно чистого титану VT1-0 на його демпфірувальні властивості.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вплив структури на демпфірувальні властивості отриманого матеріалу визначався на призматичних зразках за стандартним методом вільних коливань, що згасають [20]. Для кожного зразка записували 5 віброграм, за якими виконували розрахунок. Логарифмічний декремент коливань розраховували за віброграмами вільних коливань за формулою

$$\delta = \frac{1}{z} \ln \frac{a_k}{a_{k+z}} \cdot 100\%$$

де  $\delta$  – величина декременту коливань (у відсотках) при середній зміні напружень в матеріалі пера під тензодатчиком на ділянці амплітуд  $a_k - a_{k+z}$ ;

$a_k, a_{k+z}$  – початкова і кінцева амплітуди напружень на розглянутій ділянці віброграми (рис. 1);

$z$  – число циклів на розглянутій ділянці віброграми з початковою амплітудою  $a_k$  і кінцевою  $a_{k+z}$ .

Для порівняльної оцінки впливу ПД на демпфірувальні властивості титану VT1-0 було досліджено зразки у вихідному (литому) стані, отримані гвинтовою екструзією та відпалені при температурі

500 °C упродовж 1 години із рівноважною структурою з полідрічними зернами. Віброграми згасальних коливань зразків із різним структурним станом подані на рис. 2.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

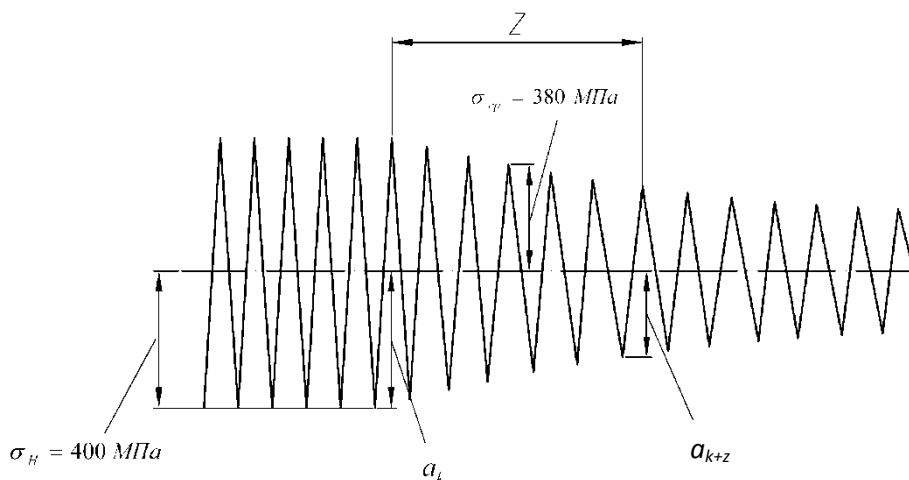
Результати розрахунку логарифмічного декременту коливань ( $\delta$ ) для досліджених зразків наведені в табл. 1.

**Таблиця 1** – Середнє значення логарифмічного декременту для досліджених зразків

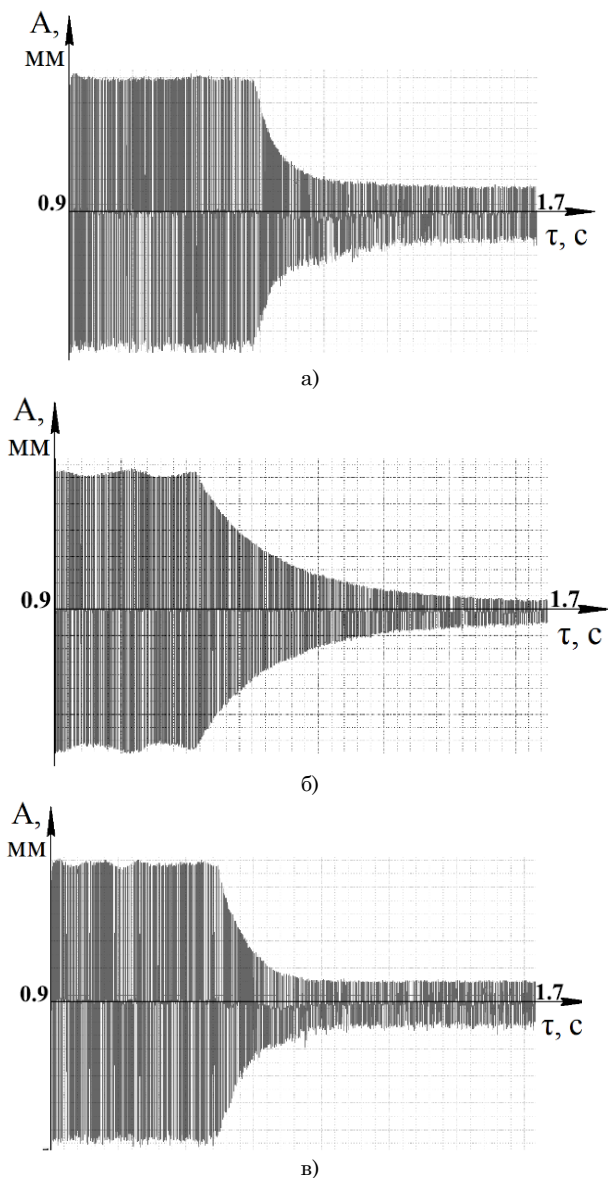
|   | Стан зразків                    | Логарифмічний декремент коливань $\delta$ , % |
|---|---------------------------------|---|
| 1 | VT1-0 у литому стані            | 3,6   |
| 2 | VT1-0 литий у відпаленому стані | 1,5   |
| 3 | VT1-0 після гвинтової екструзії | 2,6   |

Порівняльна оцінка величини логарифмічного декременту коливань дозволила виявити, що найвищі демпфірувальні властивості має титан у литому стані ( $\delta = 3,6$  %). Відпалення литих зразків призводить до різкого зниження рівня розсіювання енергії (у 2,4 раза,  $\delta = 1,5$  %). СМК зразки титану VT1-0 після гвинтової екструзії мають менший  $\delta$  порівняно з литим станом, проте відзначаються більш кращою здатністю згасання коливань щодо відпаленого зразка, для якого характерне значення логарифмічного декременту коливань  $\delta = 2,6$  % (на 1,73 раза вище за відпалений зразок).

На розсіювання коливань у металах та сплавах значною мірою впливає розмір зерен, в'язкість меж [9, 11] та рух дислокацій в об'ємі [10]. Проте більш високі значення розсіювання енергії у деформованих зразках не можуть бути пояснені лише збільшенням кількості дислокацій, протяжності зернограничних ліній та зміною їх стану, оскільки найбільші значення логарифмічного декременту коливань зафіксовані у литих зразках.



**Рис. 1.** Параметри віброграми вільних коливань для визначення логарифмічного декременту



**Рис. 2.** Схема характерних віброграм згасальних коливань зразків із титану VT1-0 у різних станах: а) литий стан; б) відпалений стан; в) після гвинтової екструзії

Оскільки, титан VT1-0 у литому стані має грубозернисту пластинчасту структуру, яка формується за принципом орієнтаційного зв'язку при нерівноважних умовах кристалізації [21], отриману структуру можна розглядати, в деякому об'ємі, як шарувату, тому за її рахунок відбувається підвищення демпфувальної здатності.

Внесок у підвищення значення логарифмічного декременту коливань можуть також робити закріплені дислокації, що характерно для литого стану матеріалу при формуванні домішкових атмосфер. Відповідно до теорії Гранато і Люке коливання цих дислокацій під дією зовнішніх змінних напружень можуть гальмуватися домішковими атомами і вакансіями, що фіксуються при нерівноважних умовах кристалізації. Оскільки «еластичність» таких дислокацій досить висока, внаслідок їх значної протяжності в об'ємі зерна, гальмування коливань буде робити

значний внесок у розсіювання енергії. Крім того, під впливом змінних навантажень такі дислокації можуть досить легко відриватись і викликати додаткове збільшення величини логарифмічного декременту коливань під час відриву і наступного руху.

При виготовленні значної частини реальних виробів з  $\alpha$ -титану використовують заготовки, що перебувають у рівноважному стані, після відпалювання. Властивості розсіювання коливань зразків у відпаленому стані, як було зазначено вище, виявилися найнижчими. Це, на думку автору, може бути пов'язане з низкою факторів:

- отримана після відпалу структура має меншу протяжність великокутових меж в порівнянні зі зразками в деформованому стані. Більш високі значення логарифмічного декременту коливань у литому зразку є наслідком особливостей кристалічної структури з пластинчастою морфологією  $\alpha$ -кристалів і відповідно більшою протяжністю великокутових меж поділу. У зразках із СМК-структурою після ПД більш інтенсивне розсіювання коливань (порівняно з відпаленим) є наслідком формування ультрадрібнозернистої структури із розвиненою сіткою великокутових меж;

- під час відпалювання значна кількість дислокацій переміщується до міжзеренних поверхонь поділу, що приводить до зниження полів внутрішніх напружень і кількості дефектів, які могли б забезпечити додатковий внесок у величину внутрішнього тертя.

Зниження (порівняно з литим станом) логарифмічного декременту коливань внаслідок ПД є результатом накопичення значного рівня пластичної деформації [8–11]. Це пов'язано з тим, що утворюється структура з великою кількістю лінійних дефектів, які мають довжину дислокаційних петель набагато нижчу, ніж у литому матеріалі. Зниження рухомості дислокацій за наявності полів напружень призводить до деякого погіршення демпфувальних властивостей СМК матеріалу.

Додатково на величину логарифмічного декременту коливань може впливати рух вакансій у процесі циклічних навантажень із розтягнутих областей до стиснених. Оскільки у процесі ПД створюються умови для насичення матеріалу великою кількістю вакансій [22], то це може обумовлювати зменшення внутрішнього тертя в матеріалі, з причини закріплення дислокацій і зменшення довжин петель [10].

#### 4. ВИСНОВКИ

Отже, можна стверджувати, що ПД позитивно впливає на демпфувальні властивості титану VT1-0, порівняно з відпаленим станом. Використання такого матеріалу при виготовленні деталей, що працюють в умовах змінних навантажень, дозволить підвищити їх довговічність. Додаткове проведення термічної обробки деформованих зразків може дещо підвищити логарифмічний декремент коливань внаслідок зниження внутрішніх напружень та кількості дефектів.

# Influence of structure on the damping capacity of commercially pure titanium BT1-0

D. V. Tkach<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Zaporozhye National Technical University, 64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhya, Ukraine, 69063

In this paper the effect of intensive plastic deformation on damping properties of titanium Ti2 is investigated. Cast samples, screw extruded samples and annealed samples were tested at room temperature. The cast titanium shows the high damping. Annealed samples leads to a dramatic reduction in energy dissipation (2.4 times). Screw extruded titanium with submicrocrystalline structure have smaller logarithmic decrement compared to the cast titanium, but higher compared to the annealed samples (1.73 times higher than annealed). A-titanium workpieces in an equilibrium state after annealing are widely used for large scale production of real parts. Therefore, because the intensive plastic deformation positively effects on Ti2 titanium damping properties compared with the annealed condition, that its use for production of the parts working in variable load conditions will increase their life time. Additional thermal treatment of deformed samples slightly increases the logarithmic decrement due to the reduction of internal stresses and the number of defects.

**Key words:** commercially pure titanium, twist extrusion, cast structure, annealed state, damping ability, the logarithmic decrement of the oscillations, scattering.

## Влияние структуры на демпфирующую способность технически чистого титана BT1-0

Д. В. Ткач<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063

В работе проведена оценка влияния интенсивной пластической деформации на демпфирующие свойства титана BT1-0. Исследовали образцы в исходном (литом) состоянии, полученные винтовой экструзией и отожженные при комнатной температуре. Установлено, что высокие демпфирующие свойства имеет титан в литом состоянии. Отжиг литых образцов приводит к резкому снижению уровня рассеяния энергии (в 2,4 раза). Образцы титана BT1-0 с субмикроструктурной структурой полученной винтовой экструзией имеют меньший логарифмический декремент колебаний по сравнению с литым состоянием, однако отмечаются лучшей способностью гашения колебаний по отношению к отожженному образцу (в 1,73 раза выше отожженного). При изготовлении большого числа реальных изделий из  $\alpha$ -титана используют заготовки, находящиеся в равновесном состоянии, после отжига. Поэтому, поскольку интенсивная пластическая деформация положительно влияет на демпфирующие свойства титана BT1-0 по сравнению с отожженным состоянием, то ее использование при изготовлении изделий, работающих в условиях переменных нагрузок, позволит повысить их долговечность. Дополнительное проведение термической обработки деформированных образцов может несколько повысить логарифмический декремент колебаний, вследствие снижения внутренних напряжений и количества дефектов.

**Ключевые слова:** технически чистый титан, винтовая экструзия, литая структура, отожженное состояние, демпфирующая способность, логарифмический декремент колебаний, рассеивание.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Забелин С. Ф. Совершенствование технологии получения металлических имплантатов биомедицинского назначения / С. Ф. Забелин, А. А. Дорожков // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2011. – № 3. – С. 85–92.
2. Маслов А. П. К вопросу эндопротезирования тазобедренного сустава / А. П. Маслов // ОТП. – 2008. – № 2. – С. 10–14.
3. Павленко Д. В. Применение сплава BT1-0 в субмикроструктурном состоянии для изготовления нагруженных элементов эндопротеза тазобедренного сустава / Д. В. Павленко, Д. В. Ткач, А. Я. Качан // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 148–154.
4. Деформационное поведение титана BT1-0 с субмикроструктурной структурой, полученной методом винтовой экструзии / В. Е. Ольшанецкий, Л. П. Степанова, В. Л. Грешта, Д. В. Павленко, Д. В. Ткач // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 11. – С. 29–33.
5. Оценка эффективности применения интенсивной пластической деформации для получения нанокристаллической структуры в титановом сплаве BT3-1 / А. В. Овчинников, Д. В. Павленко, А. Я. Качан, В. Г. Шевченко // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2007. – № 1. – С. 27–31.
6. Andraeus Ugo. Biomedical Imaging and Computational Modeling in Biomechanics / Ugo Andraeus, Daniela Iacoviello (Eds.). – Springer, 2013. – Vol. VIII. – 204 p.
7. Лоскутов А. Е. Достижения и перспективы эндопротезирования тазобедренного сустава / А. Е. Лоскутов, А. Е. Олейник // Здоров'я України. – 2010. – № 2. – С. 29–31.
8. Постников В. С. Внутреннее трение в металлах / В. С. Постников. – М.: Металлургия, 1969. – 332 с.
9. Постников В. С. Температурная зависимость внутреннего трения чистых металлов и сплавов / В. С. Постников // Успехи физических наук. – 1958. – Т. LXVI. – Вып. 1. – С. 43–77.
10. Ниблетт Д. Внутреннее трение в металлах, связанное с дислокациями / Д. Ниблетт, Дж. Уилкс // Успехи физических наук. – 1963. – Т. LXXX. – Вып. 1. – С. 125–187.
11. Puskar A. Internal friction of materials / A. Puskar. – Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2001. – 238 p.
12. Зиньковский А. П. Демпфирующая способность конструктивных элементов с наноструктурированными покрытиями / А. П. Зиньковский, И. Г. Токарь // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 36–41.

13. Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1971. – 376 с.

14. Low-frequency internal friction of  $\alpha+\beta$  titanium alloy SP-700 / X. S. Guan, H. Numakura, M. Koiwa, K. Hasegawa, C. Ouchi // *Materials Science and Engineering*, 1999. – A 272. – P. 230–237.

15. Chiaki Ouchi. Microstructural characteristics and unique properties obtained by solution treating or aging in b-rich  $\alpha+\beta$  titanium alloy / Chiaki Ouchi, Hideaki Fukai, Kohei Hasegawa // *Materials Science and Engineering* – 1999. – A 263. – P. 132–136.

16. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Академкнига, 2007. – 397 с.

17. Мулюков Р. Р. Внутреннее трение субмикроструктурного металла / Р. Р. Мулюков // *МиТОМ*. – 1999. – № 5. – С. 14–17.

## REFERENCES

1. Zabelin S. F., Dorozhkov A. A. (2011). *Uchenye zapiski ZabGGPU*. Vol. 3. pp. 85-92. [in Russian].

2. Maslov A. P. (2008). *ОТР*. Vol. 2. pp.10-14. [in Russian].

3. Pavlenko D. V., Tkach D. V., Kachan A. Ya. (2013). *Vestnik dvigatelestroeniya*. Vol. 1. pp. 148-154. [in Russian].

4. Olshaneckiy V. E., Stepanova L. P., Greshta V. L., Pavlenko D. V., Tkach D. V. (2013). *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. Vol. 11. pp. 29-33. [in Russian].

5. Ovchinnikov A. V., Pavlenko D. V., Kachan A. Ya, Shevchenko V. G. (2007). *Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii*. Vol. 1. pp. 27-31. [in Russian].

6. Andreaus Ugo, Daniela Iacoviello. (2013). Springer. Vol. VIII. 204 p.

7. Loskutov A. E., Oleynik A. E. (2010). *Zdorov'ya Ukraini*. Vol. 2. pp. 29-31. [in Russian].

8. Postnikov V. S. (1969). *Vnutrennee trenie v metallah*. M. Metallurgiya. 332 p. [in Russian].

9. Postnikov V. S. (1958). *Uspehi fizicheskikh nauk*. Vol. LXVI. Issue 1. pp. 43-77. [in Russian].

10. Niblett D. (1963). *Uspehi fizicheskikh nauk*. Vol. LXXX, Vissue. 1. pp. 125-187. [in Russian].

11. Puskar A. (2001). *Internal friction of materials*. Cambridge. Cambridge International Science Publishing. 238 p.

Zinkovskiy A. P., Tokar I. G. (2009). *Vestnik dvigatelestroeniya*. Vol. 2. pp 36-41. [in Russian].

18. Устинов А. И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов / А. И. Устинов // *Проблемы прочности*. – 2008. – № 5. – С. 96–104.

19. Ustinov A. I. Damping capacity of nanotwinned copper / A. I. Ustinov, V. S. Skorodzievskii, E. V. Fesiun // *Acta Mat.* – 2008. – Vol. 56. – P. 3770–3776.

20. Писаренко Г. С. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем / Г. С. Писаренко, В. В. Матвеев, А. П. Яковлев. – К. : Наук. думка, 1976. – 86 с.

21. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. – Л. : Машиностроение, 1977. – 248 с.

22. О возможной роли дефектов кристаллического строения в механизмах нанофрагментации зеренной структуры при интенсивной холодной пластической деформации металлов и сплавов / [А. И. Лотков, А. А. Батурин, В. Н. Гришков и др. // *Физическая мезомеханика*. – 2007. – Т. 10, № 3. – С. 67–79.

12. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V. (1971). *Vibropogloschayuschie svoystva konstrukcionnykh materialov*. K. Naukova dumka. 376 p. [in Russian].

13. Guan X. S., Numakura H., Koiwa M., Hasegawa K., Ouchi C. (1999). *Materials Science and Engineering*. Vol. A272. pp. 230–237.

14. Chiaki Ouchi, Hideaki Fukai, Kohei Hasegawa. (1999). *Materials Science and Engineering*. Vol. A263. pp. 132-136.

15. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. (2007). *Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva*. M. Akademkniga. 397 p. [in Russian].

16. Mulyukov R. R. (1999). *МиТОМ*. Vol. 5. pp. 14-17. [in Russian].

17. Ustinov A. I. (2008). *Problemy prochnosti*. Vol. 5. pp. 96-104. [in Russian].

18. Ustinov A. I., Skorodzievskii V. S., Fesiun E. V. (2008). *Acta Mat*. Vol. 56. pp. 3770-3776.

19. Pisarenko G. S. Matveev V. V., Yakovlev V. V. (1976). *Metody opredeleniya harakteristik dempfirovaniya kolebaniy uprugih system*. K. Nauk. dumka. 86 p. [in Russian].

20. Chechulin B. B., Ushkov S. S., Razuvaeva I. N., Goldfayn V. N. (1977). *Titanovye splavy v mashinostroenii*. L. Mashinostroenie. 248 p. [in Russian].

Lotkov A. I., Baturin A. A., Grishkov V. N. (2007). *Fizicheskaya mezomehanika*. Vol. 10, Issue 3. pp. 67-79. [in Russian].