

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACS numbers: 61.72.Hh, 62.20.de, 62.40.+i, 75.20.En, 75.60.Lr, 75.80.+q, 83.60.Np

Вплив слабких магнетних полів на механічні властивості берилію

Є. І. Курек, І. Г. Курек, А. В. Олійнич-Лисюк, М. Д. Раранський

*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2,
50012 Чернівці, Україна*

Досліджено поведінку пружних та непружних властивостей магнійтермічного берилієвого конденсату до, під час та після дії на нього слабких постійних магнетних полів. Проаналізовано амплітудні, температурні та часові залежності ефективного модуля зсуву, низькочастотного внутрішнього тертя та відношення швидкостей руху дислокацій. Виявлено прямий та зворотній магнетопластичний ефекти й ефекти «магнетної пам'яті». Природу виявлених ефектів проаналізовано з позицій зміни руху дислокацій з гістерезисного на в'язкий, перебіг структурно-фазових перетворень мартенситного типу з утворенням неспівмірних фаз і появи та заліковування мікротріщин на стадії пружної деформації берилію.

Ключові слова: берилій, прямий та зворотній магнетопластичні ефекти, «магнетна пам'ять», відношення швидкостей руху дислокацій, фазові перетворення мартенситного типу, неспівмірна фаза, мікротріщини.

Исследовано поведение упругих и неупругих свойств магнийтермического бериллиевого конденсата до, во время и после воздействия на него слабких постоянных магнитных полей. Проанализированы амплитудные, температурные и временные зависимости эффективного модуля сдвига, низкочастотного внутреннего трения и отношения скоростей движения дислокаций. Обнаружены прямой и обратный магнетопластический эффекты и эффект «магнитной памяти». Природа обнаруженных эффектов

Correspondence author: Alla Vasylyvna Oliynych-Lysyuk
E-mail: a_oliynich@ukr.net

*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynsky Str., 50012 Chernivtsi, Ukraine*

E. I. Kurek, I. G. Kurek, A. V. Oliynych-Lysyuk, and M. D. Rarans'ky,
The Influence of Weak Magnetic Fields on the Mechanical Properties of Beryllium,
Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 37, No. 11: 1517–1525 (2015) (in Ukrainian).

проаналізована с позицій изменения движения дислокацій с гистерезисного на вязкое, протекания структурно-фазовых превращений мартенситного типа с образованием несоответственных фаз и появления и заживления микротрещин на стадии упругой деформации бериллия.

Ключевые слова: бериллий, прямой и обратный магнитоэластический эффекты, «магнитная память», отношение скоростей движения дислокаций, фазовые превращения мартенситного типа, несоответственная фаза, микротрещины.

The behaviour of elastic and inelastic properties of magnesium-thermal beryllium condensate (MTC) before, during, and after the action of weak permanent magnetic fields on this condensate is investigated. The amplitude, temperature, and time dependences of the effective shear modulus, low-frequency internal friction, and the ratios of motion rates of dislocations are analysed. The direct and reverse magnetoplastic effects and 'magnetic memory' effects are revealed. The nature of these effects is analysed from the positions of changing of the type of dislocations motion from hysteresis motion to viscous motion, occurrence of structural and phase transformations of the martensitic type with the formation of incommensurate phases and appearance and healing of microcracks at the stage of elastic deformation of beryllium.

Key words: beryllium, direct and reverse magnetoplastic effects, 'magnetic memory', ratios of motion rates of dislocations, martensitic phase transformations, incommensurate phase, microcracks.

(Отримано 26 серпня 2015 р.)

1. ВСТУП

На сьогодні є велика кількість праць, в яких досліджувалися ефекти, що виникають під впливом слабких постійних та імпульсних магнетних полів у діямагнетиках з різним типом хемічного зв'язку. Проаналізовано магнитоеластичні ефекти (МПЕ) та ефекти «магнетної пам'яті», зміни фізико-механічних властивостей досліджуваних матеріалів та механізми прояву виявлених змін [1]. Проте залишаються відкритими питання щодо зміни знаку МПЕ з прямого на зворотній і навпаки в однакових умовах експерименту і на тих же самих діямагнетних зразках [1, 2]; про причини появи «магнетної пам'яті», про можливість її фіксації та збереження набутих у магнетному полі властивостей на тривалий час [3].

Такі дослідження для деяких конструкційних матеріалів уможливають стати на крок ближче до розв'язку питання про фізичні методи керування їх механічними властивостями для того, щоб збільшити ефективність процесів їх оброблення та ініціювати процеси релаксації внутрішніх механічних напружень, особливо у випадках, коли термічна релаксація неможлива або неефективна.

Одним з таких матеріалів є берилій, якому притаманне унікаль-

не поєднання фізико-механічних властивостей: міцний, легкий, стійкий до зовнішніх впливів та корозії, вбирач та сповільнювач нейтронів, що робить його незамінним конструкційним матеріалом в авіакосмічній та ядерній галузях промисловості. У той же час він токсичний, крихкий і питання щодо покращення його пластичних властивостей досі залишається відкритим. Його можна вирішити за допомогою слабких магнетних полів (МП), вплив яких на берилій вивчено недостатньо, праці, присвячені цьому питанню, практично відсутні. Тому такі дослідження є безумовно актуальними.

Метою цієї роботи є вивчення впливу слабких МП на механічні (пружні та непружні) характеристики берилію та дослідження механізмів і закономірностей еволюції його дефектних підсистем.

2. ЗРАЗКИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджувалися природно зістарені протягом двох років полікристали магнійтермічного берилійового конденсату (МТК Be, 99,95% Be) у формі паралелепіпедів $1,1 \times 1,1 \times 100$ мм³, основними домішками в яких були (в % мас.): O (0,006), C (0,004), Si (0,003), Al (0,003–0,015), Mg (0,003), Fe (0,009), Mn (0,003) та Ni (0,003–0,019). Аналізувалися температурні ($\cong 10$ – 200°C), амплітудні ($\gamma \cong (8$ – $30) \cdot 10^{-5}$) та часові спектри низькочастотного ($\cong 1$ Гц) внутрішнього тертя (ВТ, Q^{-1}) та ефективного модуля зсуву ($G_{\text{ef}} \propto f^2$) до, під час дії та після трикратної експозиції в слабких постійних магнетних полях ($B \cong 0,005$ – $0,04$ Тл). Вимірювання виконувалися напівавтоматичним релаксометром типу зворотного крутного маятника [4].

Для уточнення механізмів руху дефектних підсистем під дією зовнішніх слабких магнетних, механічних та теплових полів було проаналізовано амплітудні і температурні залежності параметра r :

$$r(\gamma) = Q^{-1}(\gamma) \left(\frac{\Delta G_{\text{ef}}}{G_{\text{ef}}}(\gamma) \right)^{-1} \sim Q^{-1}(\gamma) \left(\frac{\Delta f^2}{f^2}(\gamma) \right)^{-1}, \quad (1)$$

який уможливорює визначити панівний механізм руху дефектів [5], температурні та часові залежності відношення швидкостей руху дислокацій (за методикою, описаною в роботі [6]):

$$\frac{V_{\text{MF}}}{V_0} = \left(\frac{f_n^2 - f_1^2}{f_1^2} \right)_{\text{MF}}^{-1} \left(\frac{f_n^2 - f_1^2}{f_1^2} \right)_0^{-1} \quad (2)$$

та

$$\frac{V_{\text{afef}}}{V_0} = \left(\frac{f_n^2 - f_1^2}{f_1^2} \right)_{\text{afef}}^{-1} \left(\frac{f_n^2 - f_1^2}{f_1^2} \right)_0^{-1}, \quad (3)$$

де V_{MF} , V_{afef} — швидкості руху дефектів при безпосередній дії МП та після його дії відповідно, а V_0 — швидкість їх руху до початку дії поля, f_n — частота власних згасних крутих коливань зразка.

3. ПРЯМИЙ (ДОДАТНІЙ) ТА ЗВОРОТНІЙ (ВІД'ЄМНИЙ) МАГНЕТОПЛАСТИЧНІ ЕФЕКТИ

У зразках берилію, що перебували в «проміжному» структурному стані [7] в МП *in situ*, був зафіксований зворотний МПЕ [4]. За аналогічних умов експерименту для зразків в «інверсному» стані [7] мала місце їх пластифікація, що є ознакою прямого МПЕ. До того ж ефективний модуль зсуву нелінійно зменшувався, а ВТ зростало. Характерною ознакою прямого МПЕ в берилії є наявність максимуму на температурній залежності відношення швидкостей руху дислокацій $V_{MF}(t)/V_0(t)$ в околі 40°C (рис. 1, а), який свідчить про збільшення рухливості дислокацій у магнетному полі в 5–7 разів. Подальша стабілізація цього відношення вище 40°C вказує на гальмування дислокацій атмосферами точкових дефектів у базисній площині ковзання [0001].

Відмітимо, що максимальне зростання відношення швидкостей спостерігалось при другій магнетній дії: $V_{MF}(t)/V_0(t) \cong 22$ (рис. 1, а, врізка). Різке зменшення цього максимуму при третій магнетній дії вказує на релаксацію дефектних підсистем берилію в ході останнього магнетного оброблення.

При температурі 160°C зафіксовано інверсію знака $V_{MF}(t)/V_0(t)$ і осциляційні максимуми при охолодженні, які спостерігалися вперше (рис. 1, б), що вказує на протікання процесів самоорганізації дефектів. На залежності G_{ef} також спостерігалась інверсія знака МПЕ з «прямого» на «зворотний» за тієї ж температури [2]. Аналіз залежностей $r(t)$ показав (рис. 1, в), що вони добре корелюють із залежностями $V_{MF}(t)/V_0(t)$ (рис. 1, а, б) і підтверджують різку зміну рухливості дислокацій в околі 40°C та їх гальмування точковими дефектами вище зазначеної температури. Відмітимо, що залежності $V_{MF}(t)/V_0(t)$ та $r(t)$ доповнюють одна одну, і їх треба розглядати в комплексі.

3. «МАГНЕТНА ПАМ'ЯТЬ» В МТК Ве

У ході магнетної післядії в МТК Ве утворюється неспівмірна фаза. Це неупорядкована фаза, що має власну надструктуру, в якій відсутня трансляційна симетрія [8]. Витримка матеріалу при фіксованій температурі спричиняє релаксацію метастабільних станів і сприяє переходу неспівмірної фази з дефектами до рівноваги.

Перехід дефектних підсистем берилію до нового стабільного рів-

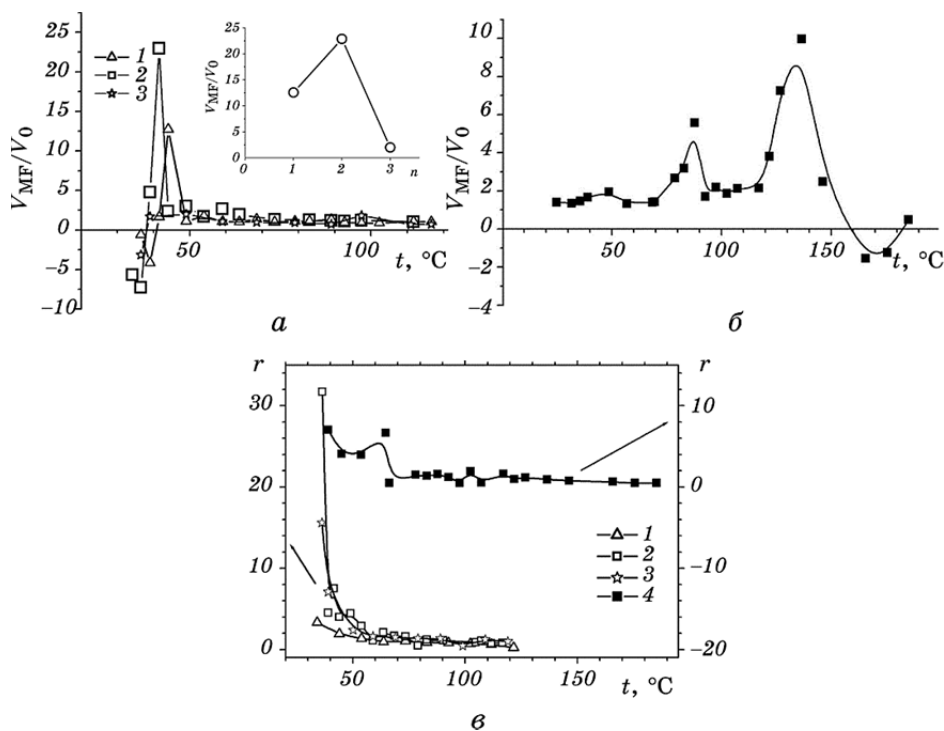


Рис. 1. Температурні залежності відношення швидкостей руху дислокацій $V_{MF}(t)/V_0$ при нагріванні (а), охолодженні (б) та параметра r (в) в МТК Ве при прямому МПЕ. Криві 1–3 одержано під час першої, другої та третьої експозиції в МП відповідно. Врізка — висота максимуму під час кожної експозиції, де n — номер експозиції (а). Криві 1–3 одержано під час першої, другої та третьої експозиції в МП при нагріванні, 4 — при охолодженні МТК Ве (в).

Fig. 1. Temperature dependences of the ratios of rates of dislocations motion at heating (a), at cooling (б), and the parameter r (в) in MTC Be at direct magnetoplastic effect. Curves 1–3 are obtained during the first, second, and third expositions in magnetic field (MF), respectively. Inset shows the height of maximum during each exposition, where n is the exposition number (a). Curves 1–3 are obtained during the first, second, and third expositions in magnetic field at heating, 4—at cooling of MTC Be (в).

новажного стану через $\cong 2100$ годин природного старіння (рис. 2, з) відбувається через низку проміжних метастабільних станів (рис. 2, б, в), для яких характерне існування неспівмірної фази. На це вказує значне розширення незамкненого зворотного гістерезису f^2 та його інверсія.

Відмітимо, що в процесі магнетної післядії ефективний модуль зростає. Утворення неспівмірної фази в процесі «магнетної пам'яті»

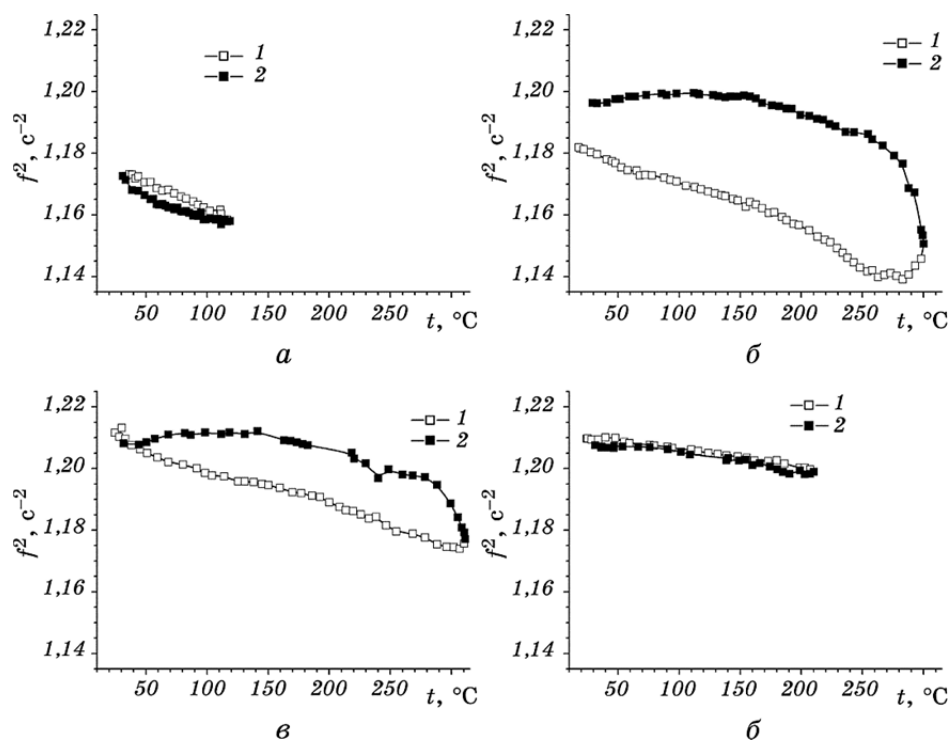


Рис. 2. Температурно-часові зрізи ефективного модуля кручення до дії МП (а) та через 480 (б), 2088 (в) та 2136 (г) годин після останньої експозиції в магнетному полі. Криві 1 — нагрівання, 2 — охолодження.

Fig. 2. Temperature-time slices of the effective shear modulus before the action (a) and after 480 (б), 2088 (в), and 2136 (г) hours after the last exposition in magnetic field. Curves: 1—heating, 2—cooling.

було зафіксовано і раніше на інших зразках МТК Ве [9].

Для з'ясування механізмів перебудови дефектних підсистем берилію в процесі магнетної післядії було проаналізовано температурні залежності параметра r (рис. 3).

Одержані результати показують, що залежність $r(t)$ магнетно обробленого Ве при нагріванні вище $t > 50^\circ\text{C}$ практично горизонтальна (слабко монотонно зростає) (рис. 3, б–г), що свідчить про безперешкодний в'язкий рух дислокацій в базисній площині ковзання. Проте в інтервалі $30\text{--}40^\circ\text{C}$ та $160\text{--}210^\circ\text{C}$ залежність $r(t)$ аномальна. Різка зміна цього параметра в інтервалі $30\text{--}40^\circ\text{C}$ (рис. 3, а, б, г) свідчить про рух дислокацій з великим прискоренням, а вузький інтервал зміни температури дозволяє припустити виникнення до того ж мікронесуцільностей на стадії пружної деформації кристалів МТК Ве як до дії МП (рис. 3, а), так і через тривалий час після останньої

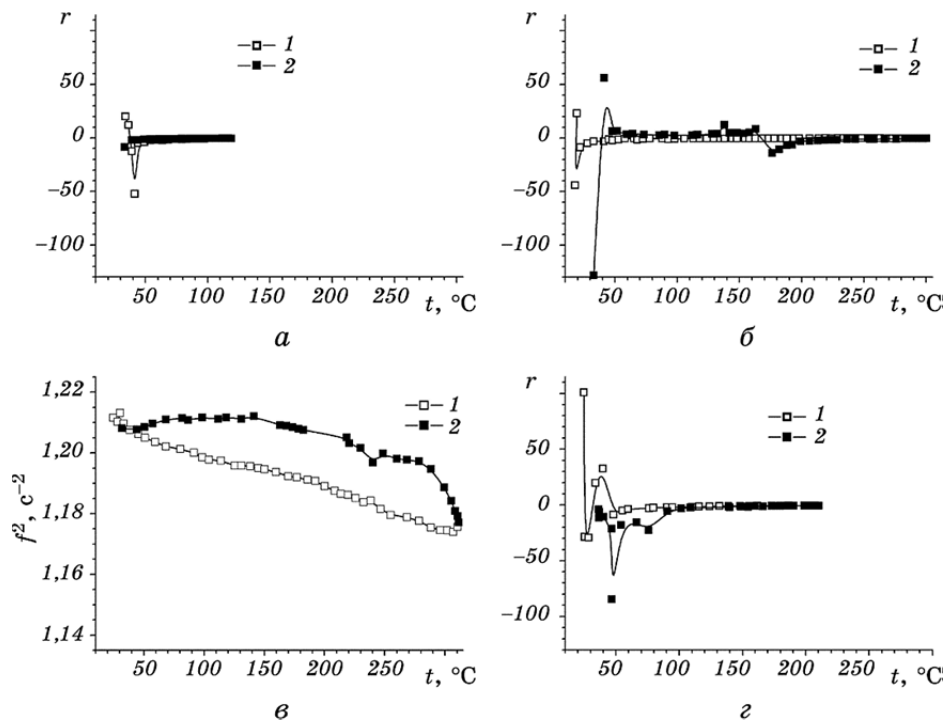


Рис. 3. Температурно-часові зрізи параметра r до дії МП (а) та через 480 (б), 2088 (в) та 2136 (г) годин після останньої експозиції в магнетному полі. 1 — нагрівання, 2 — охолодження.

Fig. 3. Temperature-time slices of the parameter r before the action of MF (a) and after 480 (б), 2088 (в) and 2136 (г) hours after the last exposition in magnetic field. Curves: 1—heating, 2—cooling.

експозиції в МП (рис. 3, б, г). Утворення мікротріщин підтверджується поведінкою амплітудно-залежного внутрішнього тертя, яке безпосередньо пов'язане з рухом дислокацій залежностями $r(\gamma)$ [10] та $V_{\text{afef}}(\gamma)/V_0(\gamma)$.

Відмітимо, що в магнетному полі й відразу після його вимкнення (до 120 год. природного старіння) мікротріщини не утворюються. Зародження дислокаційних тріщин в околі 40°C може відбуватись за рахунок блокування дислокацій новоутвореними неспівмірними фазами (рис. 3, б, г), які стають перешкодою на шляху дислокації. Це свідчить про термоактивований характер утворення мікронесуцільностей.

Температурно-часові залежності відношення швидкостей руху дислокацій V_{afef}/V_0 [2] корелюють із залежностями $f^2(t)$ (рис. 2) та $r(t)$ (рис. 3). Інверсія знака відношення $V_{\text{afef}}(t)/V_0(t)$ при нагріванні та різке зростання цього відношення при охолодженні підтверджує

припущення щодо утворення мікротріщин в околі 40°C. Згладжування стрибків $V_{\text{afef}}(t)/V_0(t)$ вище 40°C зі збільшенням часу старіння вказує на блокування дислокацій та перехід дислокаційно-домішкової підсистеми берилію в новий рівноважний стан через $\cong 2100$ годин після магнетного оброблення.

4. ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що характерною ознакою прямого МПЕ в МТК Ве є поява чітких максимумів на температурних залежностях V_{MF}/V_0 .
2. Показано, що перехід дефектних підсистем берилію в новий рівноважний стан у процесі магнетної післядії відбувається через низку метастабільних станів з утворенням неспівмірних фаз, які виникають внаслідок структурно-фазових перетворень.
3. Проаналізовано можливість появи мікротріщин на стадії пружної деформації в рівноважних кристалах МТК Ве та їх заліковування за рахунок в'язкого руху незакріплених дислокацій в базисній площині ковзання. Відмічено, що мікронесуцільності не утворюються в магнетному полі.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Е. И. Курек, И. Г. Курек, А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Физ. тверд. тела*, **55**, № 10: 1897 (2013).
2. Е. И. Курек, И. Г. Курек, А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Физ. тверд. тела*, **56**, № 8: 1546 (2014).
3. Р. Б. Моргунов, А. Л. Бучаченко, *ЖЭТФ*, **136**, № 3 (9): 505 (2009).
4. Є. І. Курек, І. Г. Курек, А. В. Олійнич-Лисюк, М. Д. Раранський, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 10: 1303 (2014).
5. С. А. Головин, А. Пушкар, Д. М. Левин, *Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов* (Москва: Металлургия: 1987).
6. А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Физ. тверд. тела*, **54** (3): 417 (2012).
7. А. В. Олійнич-Лисюк, М. Д. Раранський, *Металлофиз. новейшие технол.*, **28**, № 12: 1661 (2006).
8. С. А. Гриднев, *Природа*, **8**: 52 (2013).
9. Е. И. Курек, А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Письма в ЖТФ*, **37**, № 24: 1 (2011).
10. Є. І. Курек, І. Г. Курек, А. В. Олійнич-Лисюк, М. Д. Раранський, *5 Міжнародна конференція «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» (24–27 червня 2014, Львів)*, с. 267.

REFERENCES

1. E. I. Kurek, I. G. Kurek, A. V. Oleinich-Lysyuk, and N. D. Raranskiy, *Fizika*

- Tverdogo Tela*, **55**, No. 10: 1897 (2013) (in Russian).
2. E. I. Kurek, I. G. Kurek, A. V. Oleinich-Lysyuk, and N. D. Raranskiy, *Fizika Tverdogo Tela*, **56**, No. 8: 1546 (2014) (in Russian).
3. R. B. Morgunov and A. L. Buchachenko, *ZhETF*, **136**, No. 3 (9): 505 (2009) (in Russian).
4. E. I. Kurek, I. G. Kurek, A. V. Oleynich-Lysyuk, and M. D. Rarans'ky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 10: 1303 (2014) (in Ukrainian).
5. S. A. Golovin, A. Pushkar, and D. M. Levin, *Uprugie i Dempfiruyushchie Svoistva Konstruktsionnykh Materialov [The Elastic and Damping Properties of Structural Metallic Materials]* (Moscow: Metallurgiya: 1987) (in Russian).
6. A. V. Oleynich-Lysyuk and N. D. Raranskiy, *Fizika Tverdogo Tela*, **54**, No. 3: 417 (2012) (in Russian).
7. A. V. Oliynych-Lysyuk and M. D. Rarans'ky, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **28**, No. 12: 1661 (2006) (in Ukrainian).
8. S. A. Grignev, *Priroda*, **8**: 52 (2003) (in Russian).
9. E. I. Kurek, A. V. Oleynich-Lysyuk, and N. D. Raranskiy, *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **37**, No. 24: 1 (2011) (in Russian).
10. E. I. Kurek, I. G. Kurek, A. V. Oliynych-Lysyuk, and M. D. Rarans'ky, *Abstr. Int. Conf. Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity (June 24–27, 2014, Lviv, Ukraine)*, p. 267 (in Ukrainian).