

## ВИВЧЕННЯ ТЕРМОАКТИВОВАНОГО РУХУ ДИСЛОКАЦІЙ У БЕРИЛІЇ ПРИ ЗВОТНОМУ МАГНІТОПЛАСТИЧНОМУ ЕФЕКТІ

Досліджено температурні залежності пружних і непружних характеристик, а також відношення швидкостей руху дислокацій у магнійтермічному берилієвому конденсаті при зворотному магнітопластичному ефекті. Зафіксовано максимуми на температурних залежностях відношення швидкостей руху дислокацій, аномалії на залежностях внутрішнього тертя від температури у вигляді максимумів та їх роздвоєння у магнітному полі, інверсію знаку магнітопластичного ефекту зі зворотного на прямий і магнітонечутливу область. Отримані результати проаналізовані з позицій механізму спин-залежних реакцій в системі "дислокація – парамагнітний стопор" та можливості розмиття мартенситних перетворень з температурою у сплавах з пам'яттю форми.

**Ключові слова:** діамангнітний берилій; зворотний магнітопластичний ефект; структурні перетворення мартенситного типу.

Исследованы температурные зависимости упругих и неупругих характеристик, а также отношение скоростей движения дислокаций в магнийтермическом бериллиевом конденсате при обратном магнитопластическом эффекте. Зафиксированы максимумы на температурных зависимостях отношения скоростей движения дислокаций, аномалии на зависимостях внутреннего трения от температуры в виде максимумов и их раздвоение в магнитном поле, инверсию знака магнитопластического эффекта с обратного на прямой и магнитонечувствительную область. Полученные результаты проанализированы с позиций механизма спин-зависимых реакций в системе "дислокация – парамагнитный стопор" и возможности размытия мартенситных превращений с температурой в сплавах с памятью формы.

**Ключевые слова:** диамангнитный бериллий; обратный магнитопластический эффект; структурные преобразования мартенситного типа.

The temperature dependence of the elastic and non elastic characteristics, the relations of motion rates of dislocations in magnesium-thermal beryllium condensate at the reverse magnetoplastic effect were investigated. Maxima on the temperature dependences of the relations of motion rates of dislocations, anomalies on the temperature dependences of internal friction in the form of maxima and their cleavage in the magnetic field, the sign inversion of the magnetoplastic effect from reverse to direct and nonmagnetosensitive area were fixed. The results are analyzed from the positions of the mechanism of spin-dependent reactions in the system "dislocation – paramagnetic stopper" and the possibility of blur the martensitic transformations with temperatures in shape-memory alloys.

**Keywords:** diamagnetic beryllium; reverse magnetoplastic effect; martensitic phase transformations.

### Вступ

Інтенсивні зовнішні впливи (механічні, теплові, високоенергетичні та ін.) на реальні тверді тіла приводять до їх мікро- або макропластичних деформацій. Пластичні ефекти, які виникають при цьому, пов'язані з динамікою дефектів кристалічної структури (точкових, дислокацій, границь зерен, двійників і т.д.). Важливу роль при цьому відіграють дислокації, їх скупчення, взаємодія між собою та зі стопорами, а також їх рух під дією зовнішніх впливів. Кінетика

таких процесів на різних структурних рівнях стала поштовхом для розвитку нового напрямку в галузі фізики міцності та пластичності – фізичної мезомеханіки [1].

Зміцнення кристалів та покращення їх механічних властивостей можливе внаслідок ефекту "старіння дислокацій" [2]. Цей ефект зумовлений захопленням домішок рухомими дислокаціями, в результаті чого їх рухливість змінюється.

Першою моделлю, яка описує динамічне старіння дислокацій, була модель Коттрела

і Джесвона [3], в якій розраховували дифузю домішок у полі пружних сил дислокації, що рухається з постійною швидкістю. Наступні роботи [4, 5] враховували механізми стрибкоподібного руху дислокацій через локальні бар'єри.

Більшість кристалічних матеріалів стають пластичнішими з підвищенням температури. Цей ефект якісно і кількісно описується арреніусівським законом руху дислокацій [6]:

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{E_0(\sigma)}{kT}\right), \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість дислокацій,  $V_0$  – передекспоненційний множник,  $E_0(\sigma)$  – енергія активації руху дислокацій,  $\sigma$  – прикладена механічна напружка,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура.

Проте, існують матеріали (метали типу Ве, впорядковані сплави, інтерметаліди), поведінка дислокацій в яких не описується законом Арреніуса або описується ним лише при низьких температурах. Для таких матеріалів на температурній залежності деформуючої напружки з'являється характерний пік, пов'язаний зі спонтанною трансформацією дислокаційних ядер з рухомого в малорухливе ("сидяче") положення, названий аномалією напружки течії [6].

Механізм виникнення аномальних плато на температурних залежностях межі текучості та порушення закону Арреніуса для швидкості пластичної деформації під час деформування кристалів при  $T < 20$  К, описаний у працях [7, 8].

При вивченні температурних залежностей пружних і непружних характеристик магнітермічного берилієвого конденсату (МТК Ве) при прямому магнітопластичному ефекті (МПЕ) [9] було зафіксовано їх аномальну поведінку і виявлені максимуми відношення швидкостей руху дислокацій при температурах, порядку кімнатної. У продовженні досліджень атипової температурної залежності вищевказаних характеристик МТК Ве, у даній роботі проаналізовано їх поведінку при зворотному МПЕ в інтервалі температур  $\sim 294\text{--}358$  К з метою

вивчення закономірностей термоактивованого руху дислокацій.

### Зразки та методика експерименту

У роботі проведено дослідження полікристалічного магнітермічного берилієвого конденсату (99,95% Ве, МТК Ве), основними домішками в якому були (в mass%): О (0,006), С (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) [9, 10].

Проаналізовано поведінку пружних (ефективного модуля зсуву ( $G_{\text{ef}} \sim f^2$ )) і непружних (низькочастотного ( $\sim 1$  Гц) внутрішнього тертя (ВТ,  $Q^{-1}$ )) характеристик під впливом температурного ( $\sim 294\text{--}358$  К) і слабкого постійного магнітного ( $B \sim 0,005\text{--}0,04$  Тл) полів за відомими методиками [9, 10]. Дослідження проводилися при нагріванні та охолодженні МТК Ве в умовах одночасної дії постійних магнітного та механічного (амплітуда відносної деформації  $\gamma \sim 10^{-4}$ ) полів.

Для оцінки впливу МП на дефектну структуру Ве були розраховані відношення швидкостей руху дислокацій [10]:

$$\frac{V_n}{V_0} = \frac{\frac{f_n^2 - f_0^2}{f_1^2 - f_0^2}}{f_0^2}, \quad (2)$$

де  $V_n$  – швидкість руху дислокацій при температурі  $T$ ,  $V_0$  – швидкість руху дислокацій за кімнатної температури,  $f_n$  – частота власних згасаючих крутильних коливань зразка.

### Основні результати досліджень

Дія магнітного поля на зразки МТК Ве приводила до їх зміцнення, тобто фіксувався зворотний МПЕ. Про це свідчила поведінка температурних залежностей ефективного модуля зсуву: крива  $f^2(T)$  у магнітному полі в досліджуваному інтервалі температур знаходилася вище аналогічної кривої за відсутності МП.

Проаналізуємо спочатку поведінку пружних та непружних характеристик берилію зі зміною температури при нагріванні до накладання зовнішнього слабкого МП. На кривій  $Q^{-1}(T)$  виявлено два асиметричних максимуми ВТ при температурах  $\sim 303$  К та  $\sim 333$  К (рис. 1, кр. 2), що нетипово для конденсату Ве [9]. При цьому температурна залежність ВТ (рис.1 кр. 2) МТК Ве добре корелює із температурною залежністю ефективного модуля зсуву (рис.1 кр.1), де температура максимумів ВТ збігається із температурою сходинок на  $f^2(T)$ . Незважаючи на майже лінійний, монотонно регресний характер залежності  $f^2(T)$  (рис.1 кр.1), додатковий аналіз відношення  $\Delta f^2 / \Delta T$  підтвердив нелінійну зміну ефективного модуля зсуву, про що свідчить поява максимумів на кривих  $\Delta f^2(T) / \Delta T$  при нагріванні.

Така поведінка вказаних характеристик МТК Ве свідчить про наявність кількох механізмів перебудови дефектної підсистеми, найімовірніше, гістерезисного та в'язкого руху дислокацій в базисній площині ковзання [11]. До того ж, якщо при прямому МПЕ магнітне поле лише зменшувало ВТ [9], то при зворотному МПЕ вплив магнітного поля проявився у розщепленні кожного із наявних на рис. 1, кр. 2 максимумів  $Q^{-1}(T)$  ще на два, розміщених симетрично.

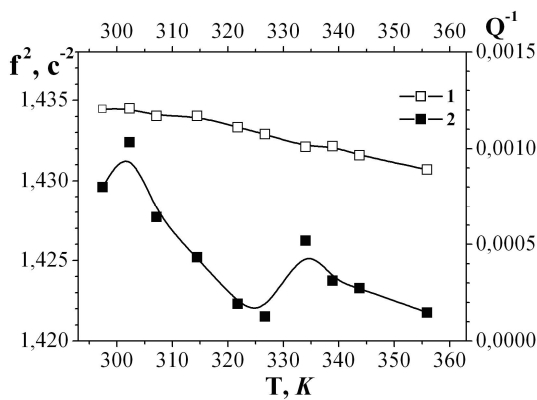


Рис. 1. Температурні залежності  $f^2$  (1) та  $Q^{-1}$  (2) в МТК Ве до дії МП при нагріванні.

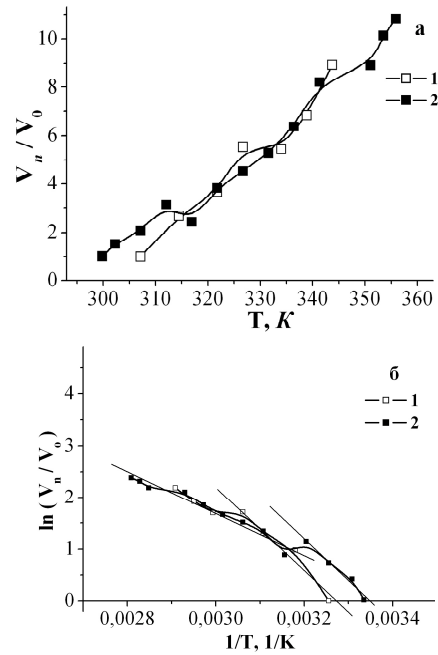


Рис. 2. Залежності  $V_n/V_0(T)$  (а) та  $\ln(V_n/V_0)(1/T)$  (б) в МТК Ве без МП (1) та у МП *in situ* (2) при нагріванні.

Результати досліджень впливу температури на рухливість дислокацій у Ве при нагріванні представлені на рис. 2. Температурна залежність  $V_n/V_0$  свідчить про зростання швидкості руху дислокацій у Ве зі збільшенням температури як до дії, так і безпосередньо під час дії МП (рис. 2а). Зростання величини  $V_n/V_0(T)$  (рис. 2а, кр. 1, 2) з температурою є немонотонним із наявністю незначних "сходинок", причому накладання магнітного поля приводить до появи не однієї (при  $T \sim 328$  К, рис. 2а, кр. 1), а двох "сходинок" на температурній залежності  $V_n/V_0(T)$  при  $\sim 313$  К та  $\sim 343$  К (рис. 2а, кр. 2).

Якщо температурна залежність швидкостей руху дислокацій  $V_n/V_0(T)$  при нагріванні підпорядковується закону Арреніуса, за нахилом залежностей  $\ln(V_n/V_0)(1/T)$  (рис. 2б), можна оцінити енергію активації перебудови дефектної підсистеми. Ця оцінка дає два значення:  $E_1=0,94$  еВ, яка характерна для енергії активації руху дислокацій в гексагональних кристалах, та  $E_2=0,33$  еВ. Зазначимо, що МП сприяє відкріпленню дислокацій від стопорів та збільшенню швидкості їх руху лише при температурах нижче

313 К, про що свідчить зміщення кривих  $V_n/V_0(T)$  та  $\ln(V_n/V_0)(1/T)$  в бік менших температур. Проте, МП не впливає на величину енергій активації. Вони продовжують відрізнятися майже у 3 рази.

Збільшення рухливості дислокацій у МТКВе без дії на нього МП пов'язується з наявністю термічних напруг, зумовлених анізотропією коефіцієнта термічного розширення [12], а магнітне поле стимулює процес термоактиваційної релаксації дефектної підсистеми берилію.

Абсолютно інша ситуація спостерігається при охолодженні берилію. Якщо при нагріванні відношення швидкостей руху дислокацій з температурою немономонно зростало, то при охолодженні на кривих  $V_n/V_0(T)$  був виявлений максимум при  $\sim 343$  К як до дії, так і під час дії МП (рис. 3). Відзначимо збільшення швидкості руху дислокацій у МП при охолодженні нижче  $\sim 338$  К.

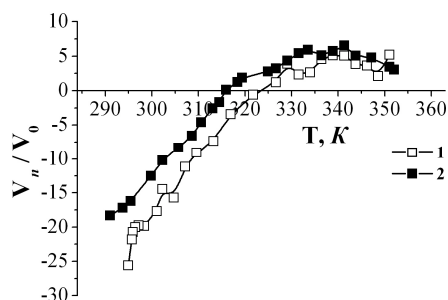


Рис. 3. Температурна залежність  $V_n/V_0$  без МП (1) та у МП in situ (2) при охолодженні.

При цьому в магнітному полі на залежностях  $f^2(T)$  виокремлювалися три ділянки, на яких зафіксовано: зворотний МПЕ (353–336 К); магнітонечутливу область (336–313 К) і ділянку інверсії знаку МПЕ зі зворотного на прямий ( $< 313$  К). У той же час, МП повністю пригнічувало ВТ, яке слабо змінювалося з температурою у всій досліджуваній області температур, що характерно для зворотного МПЕ.

Подібна ситуація виникала і при дослідженнях прямого МПЕ в зразках берилію [9, 12]. Нагадаємо, що саме наявність інверсії гістерезису пружних та відсутність чи відмінна від початкової реакція непружних

характеристик Ве на дію слабого магнітного поля [9], анізотропія МТК Ве і наявність у ньому значних термічних напруг [12] дозволили припустити стимулювання магнітним полем структурно-фазових перетворень мартенситного типу [10]. Вони спостерігалися не лише при нагріванні, але й при охолодженні [12], і пов'язані з протіканням спінзалежних реакцій у системі "дислокація – стопор" та переповзанням дислокацій перетворення.

Згідно із сучасними уявленнями про структурно-фазові перетворення мартенситного типу, які розглядаються як окремий випадок пластичної деформації, у берилії вони відбуваються за рахунок переповзання дислокацій перетворення.

Отже, для пояснення отриманих результатів можна скористатися теорією, в основу якої покладено модель розмитих мартенситних переходів, яка описує роздвоєння максимумів на кривих  $Q^{-1}(T)$  у сплавах з пам'яттю форми [13]. Розмиття мартенситних переходів з температурою й напругою виникає внаслідок існування в кристалі перешкод для руху міжфазних границь при зміні температури або напруги. Для подолання цих перешкод необхідне переохолодження (перегрів) кристалу відносно рівноважної критичної температури переходу  $T_c$ . За відсутності перешкод перетворення відбуватиметься за фіксованої температури.

Аналізуючи максимуми  $Q^{-1}(T)$  при нагріванні (рис. 1) та виходячи з припущень [13],  $T=328$  К можна розглядати як температуру структурного перетворення в МТК Ве. Моделювання амплітудно незалежного внутрішнього тертя в берилії показало, що теоретична крива на рис. 4 описується формулою наведеною в [13] з точністю до констант:

$$\frac{Q^{-1}(T)}{Q_0^{-1}} = \left[ C_1 + \cosh B \left( \frac{T - T_c}{T_c} - m_1 \frac{\sigma}{\sigma_{str}} + \frac{\sigma_f}{\sigma_{str}} \right) \right]^{-1} + \left[ C_2 + \cosh B \left( \frac{T - T_c}{T_c} + \right. \right.$$

$$\left. + m_1 \frac{\sigma}{\sigma_{str}} + \frac{\sigma_f}{\sigma_{str}} \right]^{-1} + C_3, \quad (3)$$

де  $Q_0^{-1} = 1/900$ ;  $B=12$ ;  $m_1=0,4$ ;  $\sigma=7 \cdot 10^{-1} \sigma_{str}$  – зовнішня механічна напруга;  $\sigma_f = 19 \cdot 10^{-2} \sigma_{str}$  – напруга "сухого тертя" при русі дислокацій через стопори;  $\sigma_{str}$  – напруга структурного перетворення, а  $C_1=1,7$ ;  $C_2=0,2$ ;  $C_3=0,1$  – параметри підгонки.

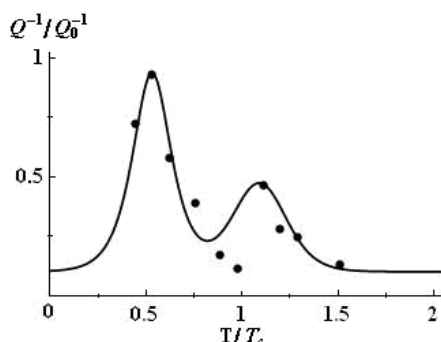


Рис. 4 Температурна залежність амплітудно незалежного внутрішнього тертя в МТК Ве до дії магнітного поля при нагріванні. Маркери – експериментальні значення, суцільна лінія – аналітична крива, побудована за формулою (3).

Припущення про наявність у берилії дислокацій перетворення підтверджують експерименти з вивчення амплітудно залежного внутрішнього тертя, яке безпосередньо пов'язане з рухом дислокацій, в яких також було зафіксовано роздвоєння максимумів ВТ у МП [14].

Наявність структурного перетворення підтверджує і симетрія максимумів  $V_{MF}/V_0(T)$  відносно  $T_c=328$  К. Проте, модель [13] не описує поведінку максимумів  $Q^{-1}(T)$  при будь-яких зовнішніх впливах (наприклад, магнітних in situ). У випадку МТК Ве, магнітне поле полегшує протікання структурно-фазових перетворень, у результаті чого  $T_c$  зменшується до температури  $\sim 318$  К.

Отримані результати вказують на те, що температурне і слабе постійне магнітне поле є причиною аномальної поведінки механічних характеристик МТК Ве, яка не корелює з сучасними уявленнями не тільки про природу зворотного МПЕ, але й про природу термофлуктуаційного руху дисло-

кацій за Арреніусом. Виявлені явища та механізми, що їх пояснюють, нетривіальні та потребують подальших досліджень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г., Курганова Ю.А. Теория и практика повышения надежности и работоспособности конструкционных металлических материалов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 268 с.
2. Петухов Б.В. Различные типы динамики дислокаций как следствие их динамического старения // ЖТФ. – 2003. – 73 (7). – С. 82 – 87.
3. Cottrell A.H., Jaswon M.A. Distribution of Solute Atoms Round a Slow Dislocation // Proc. Roy. Soc. London A. – 1949. – 199 (189). – P. 104 – 114.
4. Estin Y., Kubin L.P. Continuum Models for Materials with Micro-Structure /. – New York: Wiley&Sons LTD., 1995. – P. 395 – 450.
5. Neuhauser H., Lepinoux Ed., Maziere D. et al. Mechanical Properties of Solid Solutions and Related Topics // Academic Publishers. Series E. Dordrecht; Boston; London: Applied Sciences, 2000. – 367. – P. 99 – 115.
6. Петухов Б.В. Подвижность дислокаций со спонтанно перестраивающимися состояниями ядер и аномальная пластичность кристаллических материалов // ФТТ. – 2002. – 44 (12). – С. 2149 – 2154.
7. Suzuki T., Koizumi H. Dislocations in Solids // Proc. IX Yamada Conf. Tokyo: Univ.Press, 1985. – P. 159-65.
8. Kuramoto E., Aono Y., Kitajima K. [et al.] Thermally Activated Slip Deformation Between 0.7 and 77 K in High-Purity Iron Single Crystals // Philosophical Magazine A. – 1979. – 39 (6). – P. 717 – 724.
9. Курек Е.И., Курек И.Г., Олейнич-Лысюк А.В., Раранский Н.Д. О природе магнитоэластического эффекта в бериллиевом конденсате // ФТТ. – 2013. – 55 (10). – С. 1897 – 1902.
10. Олейнич-Лысюк А.В., Раранский Н.Д. Особенности магнитоэластического эффекта в бериллиевом конденсате // ФТТ. – 2012. – 54 (3). – С. 417 – 421.
11. Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов – М.: Металлургия, 1987. – 190 с.
12. Курек Е.И., Курек И.Г., Олейнич-Лысюк А.В., Раранский Н.Д. Об особенностях магнитного последствия в высокочистом диамагнитном бериллии // ФТТ. – 2014. – 56 (8). – С. 1546 – 1553.
13. Малыгин Г.А. Теория амплитудно-зависимого внутреннего трения и акустоэластического эффекта в сплавах с памятью формы // ФТТ. – 2000. – 42 (3). – С. 482 – 486.
14. Курек Є., Курек І., Олійнич-Лисюк А., Раранський М. Про природу максимуму на амплітудних залежностях внутрішнього тертя деяких конструкційних матеріалів // Міжнар. наук. конф. – Львів. – 2014. – С. 267– 272.