

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACS numbers: 61.72.Nh, 62.20.de, 62.40.+i, 75.20.En, 75.80.+q, 81.40.Jj

Аномалії зворотного магнетопластичного ефекту в магнійтермічному берилійовому конденсаті

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

У магнійтермічному берилійовому конденсаті при одночасній дії на зразки слабкого постійного магнетного, механічного або температурного полів (в інтервалі температур $\cong 20\text{--}100^\circ\text{C}$) зафіксовано зворотний магнетопластичний ефект (МПЕ). При цьому було досліджено поведінку амплітудних і температурно-кінетичних залежностей ефективного модуля зсуву та низькочастотного внутрішнього тертя, а також розраховано відношення швидкостей руху дислокацій у магнетному полі та без нього (V_{MF}/V_0). При накладанні слабкого постійного магнетного поля *in situ* зафіксовано розщеплення максимумів внутрішнього тертя та аномальну поведінку V_{MF}/V_0 на всіх стадіях експерименту, а також інверсію знаку МПЕ при охолодженні, якому передують формування магнетонечутливої області.

В магнійтермическом бериллиевом конденсате при одновременном действии на образцы слабого постоянного магнитного, механического или температурного полей (в интервале температур $\cong 20\text{--}100^\circ\text{C}$) зафиксирован обратный магнетопластический эффект (МПЭ). Исследовано поведение амплитудных и температурных зависимостей эффективного модуля сдвига и низкочастотного внутреннего трения, а также рассчитано отношение скоростей движения дислокаций в магнитном поле и без него (V_{MF}/V_0). Под действием слабого постоянного магнитного поля *in situ* зафиксированы расщепление максимумов внутреннего трения и аномальное поведение V_{MF}/V_0 на всех этапах эксперимента, а также инверсия знака МПЭ при охлаждении, которой предшествует формирование магнетонечувствительной области.

The reverse magnetoplastic effect (MPE) is detected in magnesium-thermal beryllium condensate at the simultaneous action of the weak permanent magnetic and mechanical or temperature fields on the samples (in the interval of temperatures $\cong 20\text{--}100^\circ\text{C}$). The behaviour of the amplitude and temperature dependences of the effective shear modulus and low-frequency internal friction of magnesium-thermal beryllium condensate is investigated.

The ratio of dislocations velocities with and without of magnetic field (V_{MF}/V_0) is calculated, and its anomalous behaviour is fixed at all stages of the experiment. As deduced, the weak constant magnetic field causes the splitting of the maximum on the curves of amplitude and temperature dependences of the internal friction, and inversion of the MPE sign at cooling, which is preceded by formation of the magnetic insensitive area.

Ключові слова: зворотний магнетопластичний ефект, ефективний модуль зсуву, низькочастотне внутрішнє тертя, швидкість руху дислокацій, діямагнетний берилій.

(Отримано 13 березня 2014 р.)

1. ВСТУП

Магнетне поле (МП) може відчутно впливати на механічні властивості діямагнетних матеріалів завдяки наявності в них дефектів кристалічної будови, які можуть мати достатню кількість неспарених спінів, тобто бути парамагнетними. За деяких умов, при накладанні МП, вони можуть утворювати «квазіферомагнетні» області [1].

При дослідженні впливу слабких МП на структуру та механічні властивості немагнетних реальних кристалів з різним типом хімічних зв'язків (йонні, ковалентні, молекулярні, металічні) було виявлено так званий магнетопластичний ефект (МПЕ) [2, 3]. Парадоксальністю даного ефекту є те, що для силового відкріплення дислокацій від стопорів не потрібно великих магнетних полів з індукцією $B \sim 100\text{--}1000$ Тл, а достатньо полів з індукцією $\sim 1\text{--}10$ Тл і менше. Вперше він був зафіксований у йонних кристалах NaCl і виявлявся у прискоренні руху дислокацій під дією слабого постійного магнетного поля за відсутності механічних навантажень [4]. Ураховуючи те, що МП впливає на рух дислокацій та їхню взаємодію зі стопорами (точковими дефектами та їх об'єднаннями), МПЕ вважають динамічним ефектом.

За характером впливу на механічні властивості твердого тіла розрізняють два види МПЕ: прямий (додатний) та зворотний (від'ємний). Прямий МПЕ полягає в зменшенні кристалу, яке виявляється в зменшенні мікротвердості, підвищенні рухливості дислокацій, збільшенні плазучості під дією МП, а зворотний, навпаки, — в зростанні мікротвердості, збільшенні модулів пружності та ін.

Зворотний МПЕ зафіксовано в йонних [5], молекулярних [6, 7], кристалах, металевих стопах [8], а інверсію знаку МПЕ в магнійтермічному берилійовому конденсаті (МТК Ве) описано в [9, 10]. Прояв зворотного МПЕ в металах і металевих стопах пояснюють зростанням внеску електронної підсистеми у в'язке гальмування дислокацій в МП. У той же час природа цього ефекту істотно залежить

від магнетних властивостей матеріялу [11] і вивчена недостатньо.

Отже, дослідження зворотного МПЕ у МТК Ве за одночасної дії магнетного поля і додаткового зовнішнього збуджувальних теплового або механічного полів з метою з'ясування його мікромеханізмів є актуальним.

2. ЗРАЗКИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У даній роботі досліджували полікристалічний магнійтермічний берилійовий конденсат (99,95% Ве, МТК Ве), одержаний з парової фази шляхом конденсації Ве, відновленого магнієм, на підложжя з температурою 500–600°C [16, 17]. Зразки для досліджень вирізали з пластин конденсату у вигляді паралелепіпедів 1,1×1,1×100 мм із наступним розчиненням деформованого шару. Середній розмір зерна, визначений металографічним методом, складав приблизно 50–70 мкм. За даними хімічної аналізи основними домішками були (в % мас.): О (0,006), С (0,004), Fe (0,009), Si (0,003), Al (0,003–0,015), Mg (0,003), Mn (0,003), Ni (0,003–0,019).

Берилій — гексагональний кристал, що має металевий тип зв'язку і у зовнішньому МП поводить себе як діамагнетик. Ураховуючи динамічний характер МПЕ та той факт, що властивості реальних кристалів значною мірою залежать від динаміки дефектної підсистеми, при їх дослідженні доцільно використовувати висоочутливі методи вивчення недосконалостей кристалічної ґратниці. Одним із них є метод низькочастотного внутрішнього тертя (НЧВТ) в комбінації з визначенням ефективних модулів пружності. У даній роботі проаналізовано зміни поведінки низькочастотного ($\cong 1$ Гц) внутрішнього тертя (ВТ, Q^{-1}) і ефективного модуля зсуву ($G_{ef} \propto f^2$) МТК Ве у слабкому постійному зовнішньому МП з індукцією $B \cong 0,005\text{--}0,04$ Тл, яке створювалося за допомогою соленоїда на струмах насичення. Вимірювання Q^{-1} та G_{ef} виконували на напівавтоматичному релаксометрі у вакуумі 10^{-3} Па в інтервалі температур 20–100°C і відносних деформацій кручення $\gamma \cong (10\text{--}30) \cdot 10^{-5}$. З метою уникнення втягування тримачів зразків у МП їх виготовляли з немагнетних сортів сталі. Для уникнення впливу індукційних ефектів (вихрових мікро- та макрострумів, електропластичного ефекту) вимірювання розпочинали через певний час після вмикання або вимикання МП.

Дослідження впливу МП на пружні (G_{ef}) та непружні (ВТ) характеристики МТК Ве виконували при різних комбінаціях збуджувальних факторів: в умовах одночасної дії постійного магнетного і змінного механічного полів за кімнатної температури та за одночасної дії постійного магнетного, постійного механічного і змінного температурного полів.

Для оцінки відношення швидкостей руху дислокацій в магнет-

ному полі до швидкості їх руху без магнетного поля V_{MF}/V_0 було використано методику, запропоновану в роботах [9, 10, 12]:

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

де V_{MF} — швидкість руху дислокацій у МП, V_0 — швидкість руху дислокацій без МП, f_n — частота власних згасних крутильних коливань зразка.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 1 представлено амплітудні залежності f^2 , V_{MF}/V_0 та Q^{-1} , одержані в МП та без нього за кімнатної температури при збільшенні амплітуди відносної деформації.

Як видно з рисунка 1, а амплітудна залежність ефективного модуля зсуву в МП знаходиться вище такої ж залежності, одержаної за відсутності МП, що свідчить про зміцнення кристалу, тобто про від'ємний МПЕ. У той же час, при збільшенні відносної деформації (γ) значення відношення швидкостей руху дислокацій V_{MF}/V_0 майже не залежать від γ і коливаються в околі одиниці, проте можна було б очікувати, що швидкості руху дислокацій в МП при зворотному МПЕ будуть істотно меншими від V_0 , одержаного без дії поля.

Відмітимо, що дія МП не призводить до зміни рівня поглинання пружної енергії, як того можна було б очікувати, а виявляється у розщепленні максимуму на амплітудній залежності ВТ на два (рис. 1, б, крива 2). Усі спостережувані явища виявились повністю зворотними: після вимкнення МП спостерігалось зменшення G_{ef} та

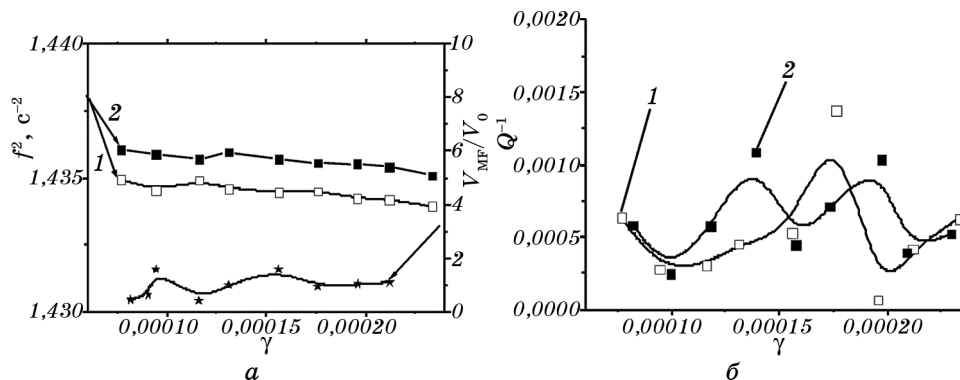


Рис. 1. Амплітудні залежності f^2 , V_{MF}/V_0 (а) та Q^{-1} (б) без МП (1) і у МП *in situ* (2) при збільшенні амплітуди відносної деформації.

відтворення одинарного максимуму на кривих амплітудно-залежного внутрішнього тертя (АЗВТ).

Необхідно також зауважити, що така залежність $Q^{-1}(\gamma)$ в МТК Ве є двічі аномальною: по-перше, вона виходить за межі теорії Гранато–Люкке, яка описує ВТ у стабільних матеріалах, і не передбачає наявності максимумів на кривих АЗВТ, по-друге, максимум АЗВТ у магнетному полі розщеплюється. Стосовно першого, то дотепер немає чіткого уявлення про моделі та механізми, що можуть пояснити природу максимумів на амплітудних залежностях ВТ.

Для пояснення може бути використаний Роджерсів модель [13], який припускає існування в кристалі дислокаційної системи зі стопорами двох типів і передбачає існування максимуму АЗВТ, проте відмінного від спостережуваного, і не передбачає розщеплення його на два.

Для з'ясування механізмів даного явища проаналізуємо амплітудні залежності швидкості зміни модуля пружності зі зміною відносної деформації. Відмітимо, що залежність $\Delta f^2/\Delta\gamma$ до дії МП (рис. 2, а, крива 1) суттєво нелінійна, а максимум ВТ асиметричний, з різним характером поведінки до і після Q_{\max} (рис. 2, а, крива 2). Вмикання МП приводить до «впорядкування» $\Delta f^2/\Delta\gamma$ та до розщеплення максимуму ВТ на два (рис. 2, б, крива 2).

Як бачимо, в магнетному полі амплітудні залежності $\Delta f^2/\Delta\gamma$ добре корелюють з поведінкою ВТ: збільшення ВТ супроводжується зростанням $\Delta f^2/\Delta\gamma$, що не дозволяє розглядати механізм відриву дислокацій від стопорів як причину виникнення максимуму на кривих АЗВТ в МТК Ве. Швидше за все, дислокації в'язко рухаються в оточенні стопорів, на що вказує поведінка параметра $r = Q^{-1}(\Delta f^2/f^2)^{-1}$, зростання якого зі збільшенням γ свідчить на користь припущення про в'язкий рух незакріплених дислокацій в МТК Ве в базисній

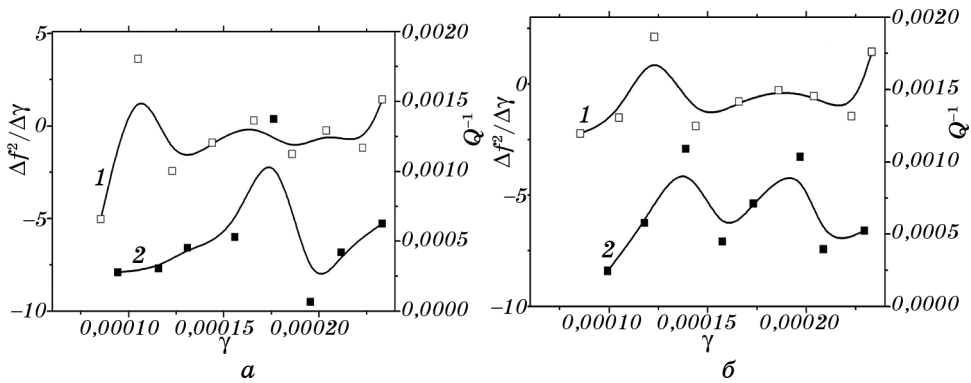


Рис. 2. Амплітудні залежності швидкості зміни ефективного модуля зсуву $\Delta f^2/\Delta\gamma$ (1) та Q^{-1} (2) без МП (а) і у МП *in situ* (б) за кімнатної температури.

площині [14].

Такі припущення підтверджують також оцінки значень критичних деформацій γ_c , при яких дислокації в площині базису, єдині активні дефекти при кімнатних температурах в МТК Ве, безактиваційно відриваються від точок закріплення ($\gamma_c = 13 \cdot 10^{-5}$), що непогано узгоджується з літературними даними [15].

Оскільки МТК Ве є структурованим полікристалом, то при підвищенні температури, окрім зовнішніх механічних напруг, вмикаються й внутрішні, термічні, зумовлені різними значеннями коефіцієнтів термічного розширення у Ве в нормальному та паралельному до осі c напрямках [16, 17].

Розглянемо детальніше вплив температури на пружні та непружні характеристики берилію. На рисунку 3 наведено температурні залежності f^2 , Q^{-1} , V_{MF}/V_0 при нагріванні зразка. Крива ефективного модуля зсуву в МП в інтервалі температур 12–80°C знаходиться вище аналогічної кривої за відсутності МП (рис. 3, а), що свідчить про зміцнення зразків МТК Ве та фіксацію в ньому зворотного МПЕ. При цьому температурні залежності ВТ і $V_{MF}/V_0(T)$ у магнет-

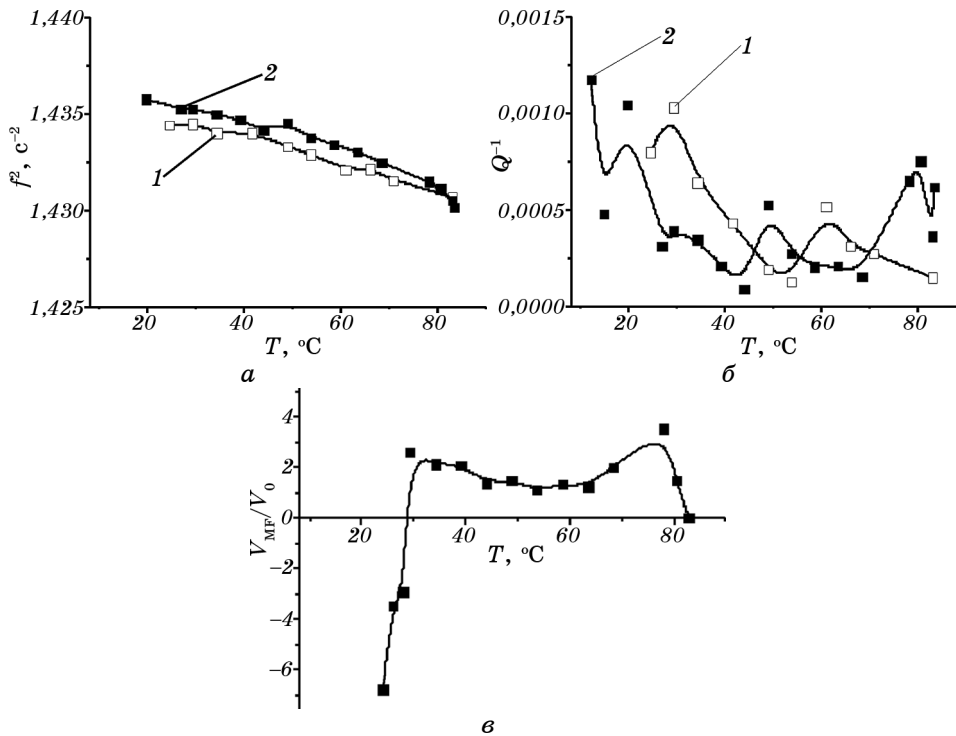


Рис. 3. Температурні залежності f^2 (а), Q^{-1} (б) та V_{MF}/V_0 (в) у МТК Ве без МП (1) і у МП *in situ* (2) при нагріванні.

ному полі не такі однозначні. Перші повністю корелюють з кривими АЗВТ: температурні максимуми ВТ у магнетному полі також розщеплюються (рис. 3, б). Можливо це пов'язано з тим, що при збільшенні температури в берилії наростають термічні напруження, пов'язані з анізотропією коефіцієнтів термічного розширення, тому амплітудні і температурні залежності ВТ поводять себе однотипно.

Залежність $V_{MF}/V_0(T)$ свідчить про зростання швидкості руху дислокацій у Ве в МП зі збільшенням температури (рис. 3, в). Зазначимо, що для зворотного МПЕ збільшення рухливості дислокацій з температурою в МП не було б аномальним, як би воно відбувалося в околі температур конденсації дислокаційної атмосфери за експоненціальним законом, як це має місце в більшості кристалів. У нашому випадку зростання величини V_{MF}/V_0 з температурою є немонотонним: на її температурній залежності спостерігаються два максимуми при температурах 34°C і 80°C. Така залежність ВТ і V_{MF}/V_0 від температури підтверджує наявність кількох механізмів релаксації дефектної підсистеми в берилії при нагріванні в МП.

Відмітимо кращу кореляцію пружних характеристик МТК Ве з температурною залежністю V_{MF}/V_0 (рис. 4, б) при охолодженні. На кривих $V_{MF}/V_0(T)$ можна виділити три температурні інтервали:

- в інтервалі 80–63°C має місце зворотний МПЕ, при якому $V_{MF}/V_0(T) < 1$;
- в інтервалі 63–40°C — магнетонечутливий стан із $V_{MF}/V_0(T) \cong 1$;
- нижче 40°C — прямий МПЕ, при якому $V_{MF}/V_0(T) > 1$.

Зазначимо, що на температурній залежності V_{MF}/V_0 при охолодженні в околі 26°C спостерігається чіткий максимум, при цьому відношення швидкості руху дислокацій збільшується майже в 6 разів, що характерно для прямого МПЕ в МТК Ве [10]. До того ж рівень ВТ у магнетному полі зменшується і слабо змінюється з температурою у всій області температур, що характерно для зворотного МПЕ.

Отже, досліджувані характеристики МТК Ве і при нагріванні, і при охолодженні в МП поводять себе аномально, що погано вписується в сучасні уявлення про природу від'ємного МПЕ. Справді, якщо припустити блокування руху дислокацій в МП парамагнетними стопорами, то це навряд чи призвело би до одночасного зростання швидкості їх руху та зменшення середнього рівня поглинання пружної енергії, як це спостерігається при нагріванні і охолодженні. Така поведінка досліджуваних характеристик швидше за все свідчить про в'язкий рух дислокацій, який при зворотному МПЕ супроводжується збільшенням внеску електронної підсистеми в гальмування руху дислокацій.

Появу чіткого максимуму на кривих $V_{MF}/V_0(T) > 1$ при охолодженні в області прямого МПЕ можна пояснити відривом дислока-

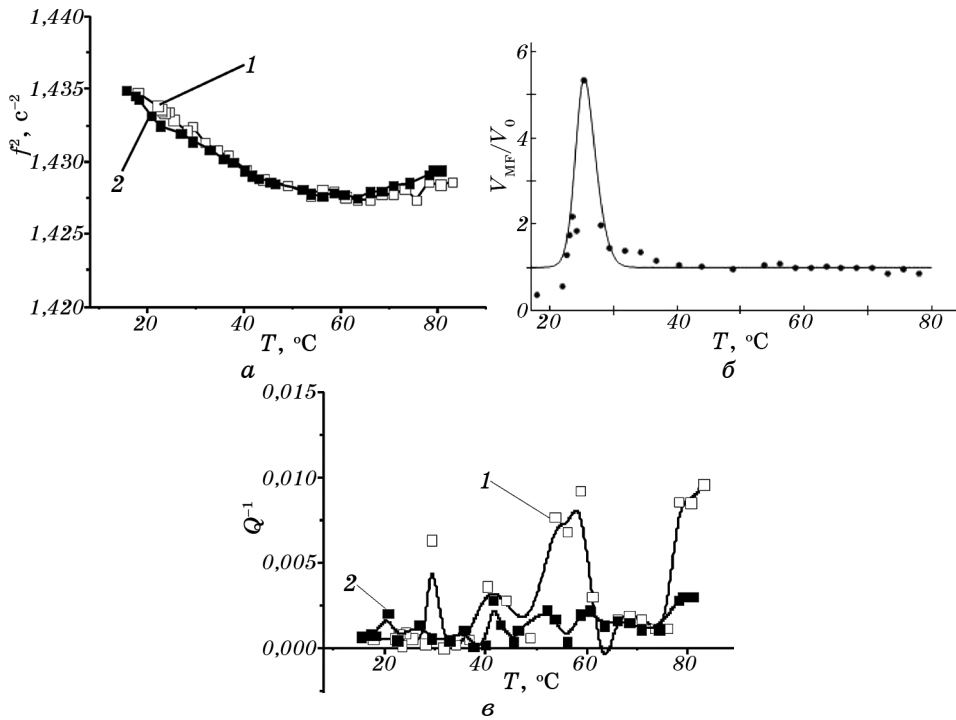


Рис. 4. Температурні залежності f^2 (а), V_{MF}/V_0 (б) та Q^{-1} (в) у МТК Ве без МП (1) і у МП *in situ* (2) при охолодженні. Маркери — це значення відношення швидкостей руху дислокацій, побудовані за формулою (1); суцільна лінія — аналітична крива, побудована за формулою (2) (б).

цій від парамагнетних стопорів і апроксимувати залежність виразом

$$\frac{V_{MF}}{V_0} = A \frac{x^n(T)}{1 + x^n(T)} \exp(-x^5(T)) + B, \quad (2)$$

де A , B та n — параметри припасування, а $x(T)$ — характеристичні напруги гальмування дислокацій, які за відсутності структурно-фазових перетворень визначаються за формулою:

$$x(T) = \frac{\sigma(T_{room}) + \frac{\Delta\sigma_{ij}(\Delta T)}{\Delta T} (T - T_{room})}{\sigma_{cr}}, \quad (3)$$

де T (T_{room}) — температура (кімнатна температура), σ_{cr} — критична напруга, а константа $\Delta\sigma_{ij}(\Delta T) = C_{ijhl}\alpha_{lh}\Delta T$ для МТК Ве пов'язана з різним значенням коефіцієнтів термічного розширення α_{lh} Ве в норма-

льному та паралельному до осі c напрямках [16, 17].

Наявність ступеневої та експоненційної частин у (2) вказує на існування кількох механізмів перебудови дефектної підсистеми берилію.

4. ВИСНОВКИ

1. Зафіксовано зворотний магнетопластичний ефект у МТК Ве за одночасної дії механічного або температурного і слабкого постійного магнетного полів в інтервалі температур $\cong 20-100^\circ\text{C}$.
2. Показано, що слабке постійне магнетне поле призводить до розщеплення максимуму (ів) на амплітудних (температурних) залежностях внутрішнього тертя.
3. На всіх стадіях експерименту виявлено аномальну поведінку відношення швидкостей руху дислокацій у магнетному полі та за його відсутності.
4. Зафіксовано зміну типу МПЕ зі зворотного на прямий, яка проходить через магнетонечутливий стан при охолодженні МТК Ве.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. И. Пинчук, С. Д. Шаврей, *Физика твёрдого тела*, **46**, вып. 9: 1603 (2004).
2. Ю. И. Головин, *Физика твёрдого тела*, **46**, вып. 5: 769 (2004).
3. Р. Б. Моргунов, *Успехи физических наук*, **174**, вып. 2: 131 (2004).
4. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина, А. А. Урусовская, *Физика твёрдого тела*, **29**, вып. 2: 467 (1987).
5. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, *Письма в ЖЭТФ*, **88**, вып. 7: 500 (2008).
6. Ю. А. Осипьян, Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, Р. К. Николаев, И. А. Пушкин, С. З. Шмурак, *Физика твёрдого тела*, **43**, вып. 7: 1333 (2001).
7. В. И. Смирнов, В. В. Шпейзман, Н. Н. Песчанская, Р. К. Николаев, *Физика твёрдого тела*, **44**, вып. 10: 1915 (2002).
8. Ю. В. Осинская, С. С. Петров, А. В. Покоев, В. В. Рунов, *Физика твёрдого тела*, **52**, вып. 3: 486 (2010).
9. Е. И. Курек, А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Письма в ЖТФ*, **37**, вып. 24: 1 (2011).
10. Е. И. Курек, И. Г. Курек, А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Физика твёрдого тела*, **55**, вып. 10: 1897 (2013).
11. М. И. Молоцкий, *Физика твёрдого тела*, **35**, вып. 1: 11 (1993).
12. А. В. Олейнич-Лысюк, Н. Д. Раранский, *Физика твёрдого тела*, **54**, вып. 3: 417 (2012).
13. D. H. Rogers, *J. Appl. Phys.*, **33**, No. 3: 781 (1962).
14. С. А. Головин, А. Пушкар, Д. М. Левин, *Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов* (Москва: Металлургия: 1987).

15. Д. М. Левин, В. Г. Ткаченко, Н. К. Лашук, И. Ю. Канунникова, *Известия ВУЗов. Физика*, № 6: 60 (1990).
16. В. Г. Стронгин, В. Г. Ткаченко, А. В. Олейнич, Н. К. Лашук, *Физ. мет. металлвед.*, вып. 11: 187 (1990).
17. Л. А. Мерзгиевский, С. А. Шамонин, *Журнал прикладной механики и технической физики*, № 5: 170 (1980).

REFERENCES

1. A. I. Pinchuk and S. D. Shavrey, *Fizika Tverdogo Tela*, **46**, Iss. 9: 1603 (2004) (in Russian).
2. Yu. I. Golovin, *Fizika Tverdogo Tela*, **46**, Iss. 5: 769 (2004) (in Russian).
3. R. B. Morgunov, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **174**, Iss. 2: 131 (2004) (in Russian).
4. V. I. Al'shits, E. V. Darinskaya, T. M. Perekalina, and A. A. Urusovskaya, *Fizika Tverdogo Tela*, **29**, Iss. 2: 467 (1987) (in Russian).
5. V. I. Al'shits, E. V. Darinskaya, and M. V. Koldaeva, *Pis'ma v ZhETF*, **88**, Iss. 7: 500 (2008) (in Russian).
6. Yu. A. Osip'yan, Yu. I. Golovin, R. B. Morgunov, R. K. Nikolaev, I. A. Pushnin, and S. Z. Shmurak, *Fizika Tverdogo Tela*, **43**, Iss. 7: 1333 (2001) (in Russian).
7. B. I. Smirnov, V. V. Shpeyzman, N. N. Peschanskaya, and R. K. Nikolaev, *Fizika Tverdogo Tela*, **44**, Iss. 10: 1915 (2002) (in Russian).
8. Yu. V. Osinskaya, S. S. Petrov, A. V. Pokoev, and V. V. Runov, *Fizika Tverdogo Tela*, **52**, Iss. 3: 486 (2010) (in Russian).
9. E. I. Kurek, A. V. Oleinich-Lysyuk, and N. D. Raranskii, *Pis'ma v ZhTF*, **37**, Iss. 24: 1 (2011) (in Russian).
10. E. I. Kurek, I. G. Kurek, A. V. Oleinich-Lysyuk, and N. D. Raranskii, *Fizika Tverdogo Tela*, **55**, Iss. 10: 1897 (2013) (in Russian).
11. M. I. Molotskiy, *Fizika Tverdogo Tela*, **35**, Iss. 1: 11 (1993) (in Russian).
12. A. V. Oleinich-Lysyuk and N. D. Raranskii, *Fizika Tverdogo Tela*, **54**, Iss. 3: 417 (2012) (in Russian).
13. D. H. Rogers, *J. Appl. Phys.*, **33**, No. 3: 781 (1962).
14. S. A. Golovin, A. Pushkar, and D. M. Levin, *Uprugie i Dempfiruyushchie Svoystva Konstruktsionnykh Metallicheskih Materialov* (Moscow: Metallurgiya: 1987) (in Russian).
15. D. M. Levin, V. G. Tkachenko, N. K. Lashuk, and I. Yu. Kanunnikova, *Izvestiya VUZov. Fizika*, No. 6: 60 (1990) (in Russian).
16. B. G. Strongin, V. G. Tkachenko, A. V. Oleynich, and N. K. Lashuk, *Fiz. Met. Metalloved.*, Iss. 11: 187 (1990) (in Russian).
17. L. A. Merzhievskiy and S. A. Shamoinin, *Zhurnal Prikladnoy Mekhaniki i Tekhnicheskoy Fiziki*, No. 5: 170 (1980) (in Russian).