

ЗМІНА ПРУЖНИХ ТА НЕПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІАМАГНЕТИКА У РІЗНИХ СТРУКТУРНИХ СТАНАХ ПІД ВПЛИВОМ СЛАБКОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Вивчена поведінка ефективного модуля зсуву та низькочастотного внутрішнього тертя у різних структурних станах діамагнітного МТБК берилію в слабкому магнітному полі. Показано, що помітний магнітопластичний ефект при кімнатних температурах в конденсаті берилію спостерігається лише, в так званому, "інверсному" стані. На основі аналізу отриманих результатів запропонована методика оцінки швидкості руху дислокацій у діамагнітних матеріалах в магнітному полі

The behavior of effective shear modulus and low frequency internal friction in different structural states of diamagnetic beryllium condensate in weak magnetic field was investigated. It was shown that a marked magneto-plastic effects at room temperatures in Be observe only in so called "inverse" state. In was suggested the method of appraisal a dislocation velocity in diamagnetic materials in magnetic field on the base of the analysis of obtained results.

Вступ

Про те, що дислокаційна структура в магнітних матеріалах може активуватись не тільки механічними напруженнями але й магнітними полями знають доволі давно. А про те, що дислокації у немагнітних матеріалах можуть прискорюватися слабкими магнітними полями (СМП) вчені довідались відносно недавно [1].

Систематичні дослідження цього явища розпочались, очевидно, з відкриттям у 1987 році В.І. Альшицем та співавторами [1] магнітопластичного ефекту (МПЕ). Для пояснення МПЕ довелося використовувати не тільки традиційні для теорії пластичності дислокаційно-мікроскопічні, але й зовсім нові електронно-спінові та навіть спін-ядерні уявлення [1]. Річ у тому, що енергія магнітного поля з величиною магнітної індукції $B < 1$ Тл у сотні разів менша тієї, яку необхідно затратити на одиничний акт руху дислокації. За допомогою МП такої величини можна хіба що змінити напрямок спіну атома, але неможливо, якщо виходити з класичних уявлень, заставити рухатись дислокації у кристалах так швидко, як про це повідомлялося в праці [1]. Для пояснення можливих механізмів збільшення пластичності немагнітних матеріалів під дією МП був запропонований механізм депінінгу дислокацій за рахунок конверсії спінів у системі "дислокація-дислокаційний стопор" [2]. Однак природа МПЕ на сьогоднішній день виявлена далеко не повніс-

тю, оскільки сучасна модель депінінгу носить в основному якісний характер і потребує подальших експериментальних досліджень.

Експеримент

У даній роботі наведені результати вивчення впливу слабкого ($\sim 0,03$ Тл) постійного МП на низькочастотне внутрішнє тертя (ВТ) і поведінку ефективного модуля зсуву G_{ef} в магністермічному конденсаті (МТК) берилію. Вибір методики та об'єкта дослідження був продиктований такими міркуваннями. По-перше, берилій при кімнатних температурах – діамагнітний матеріал з $\chi \sim -10^{-7}$. По-друге, в МТК Be в інтервалі 50–400°C спостерігали ряд незвичайних фазових перетворень, які приводять до постійної дестабілізації дислокаційно-домішкової структури [3], що є, як відомо, необхідною умовою існування МПЕ [1]. По-третє, і низькочастотне ВТ, і G_{ef} надзвичайно чутливі саме до змін в системі "дислокація-дислокаційний стопор".

Дослідження проводили на МТК Be, що містить 99,95% Be і отриманий з парової фази на сталеву підкладку. Вимірювали температурні та амплітудні залежності ВТ та G_{ef} на напівавтома-тичному релаксометрі типу обернений крутильний маятник за відомою методикою [4] на частоті 1 Гц, в інтервалі температур 20–300°C та деформацій кручення $1-3 \cdot 10^{-6}$, у вакуумі $\sim 10^{-3}$ Па.

Магнітне поле створювали соленоїдом на постійному струмі. Вимірювання ВТ і G_{ef} проводили в магнітному полі *in situ*, а також до і після дії МП.

Похибка при вимірюваннях ВТ не перевищувала 3%, а при вимірюванні квадрата частоти вільних крутильних коливачь f^2 , пропорційного, як відомо, до G_{ef} – 0,1%.

Результати та їх обговорення

Результати досліджень впливу МП *in situ* на температурні залежності ВТ і G_{ef} наведені на рис. 1,2. Видно, що в СМП помітно зменшується температурний гістерезис модуля зсуву і суттєво зростає нестабільність ВТ при нагріванні як до 100°C, так і до 200°C. Важливо, що всі ці явища повністю зворотні: виключення МП приводить до стабілізації ВТ і відновлення температурного гістерезису G_{ef} .

Деякі сеанси дії постійного СМП на МТК Ве приводять до помітних явищ післядії. Через 170 годин після дії МП температурні спектри ВТ і G_{ef} суттєво змінюються. Окрім того, нагрівання до 300°C приводить до інверсії модуля пружності: криві $G_{ef}(T)$ при охолодженні про-

дять значно вище цих же кривих при нагріванні – своєрідний зворотний гістерезис. При цьому рівень і характер поведінки ВТ залишився практично незмінним.

На рис. 3 наведені результати дослідження впливу слабого МП на амплітудні залежності ВТ (ΔZVT) і $G_{ef}(\Delta ZG_{ef})$, виміряні при кімнатних температурах. Очевидно, що вплив СМП на ВТ проявляється лише у незначній стабілізації рівня поглинання пружної енергії. Водночас рівень G_{ef} і характер його змін з амплітудою деформації γ реагують на присутність СМП більш виразно. Так відносна зміна модуля зсуву $\Delta G_{ef}/G_{ef}$ в "інверсному" стані з ростом амплітуди деформації при кімнатних температурах без МП складає $3,586 \cdot 10^{-3}$, а в МП при однакових умовах вимірювання зростає до $5,698 \cdot 10^{-3}$ (збільшується в 1,6 рази). Відмітимо, що це явище було абсолютно зворотним. Отже, в МП ефективний модуль зсуву МТК Ве сильніше реагує на деформацію крученням, ніж поглинання пружної енергії. Водночас, якщо Ве знаходився в "основному" структурному стані, СМП не впливало на амплітудні залежності ВТ (див. рис. 4).

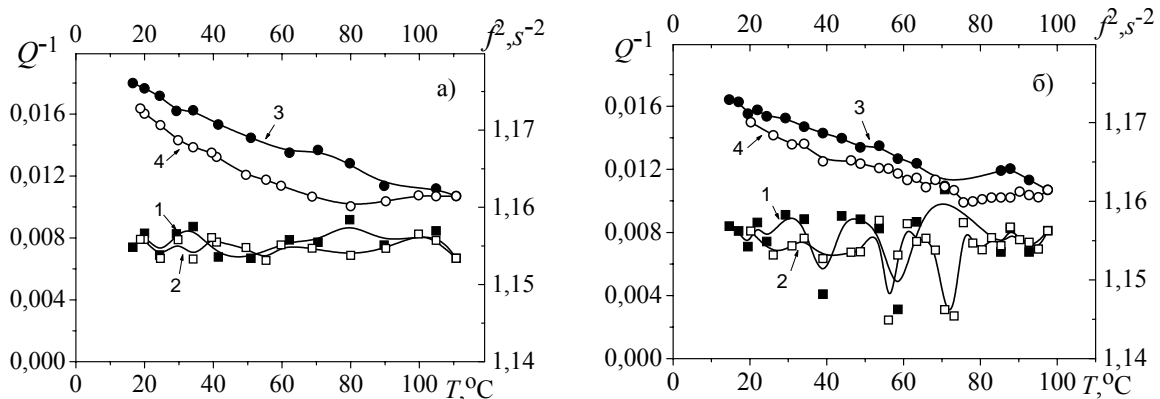


Рис. 1. Температурні залежності ВТ (1,2) і f^2 (3,4) при нагріванні до $\sim 110^\circ\text{C}$ без СМП (а) і в СМП ($B=0,03$ Тл) (б). Криві 1,3 отримані при нагріванні, 2, 4 – при охолодженні

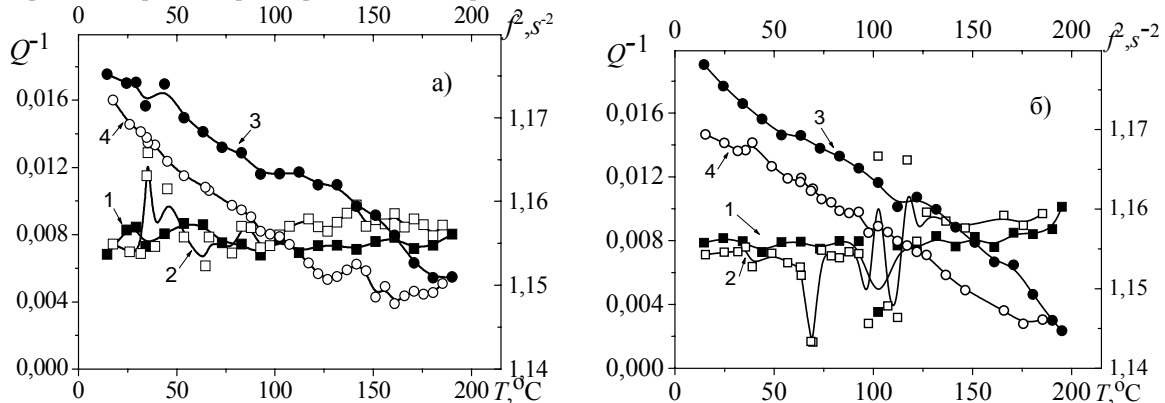


Рис. 2. Температурні залежності ВТ (1,2) і f^2 (3,4) при нагріванні до 200°C без СМП (а) і в СМП (б). Нумерація кривих така ж як на рис. 1

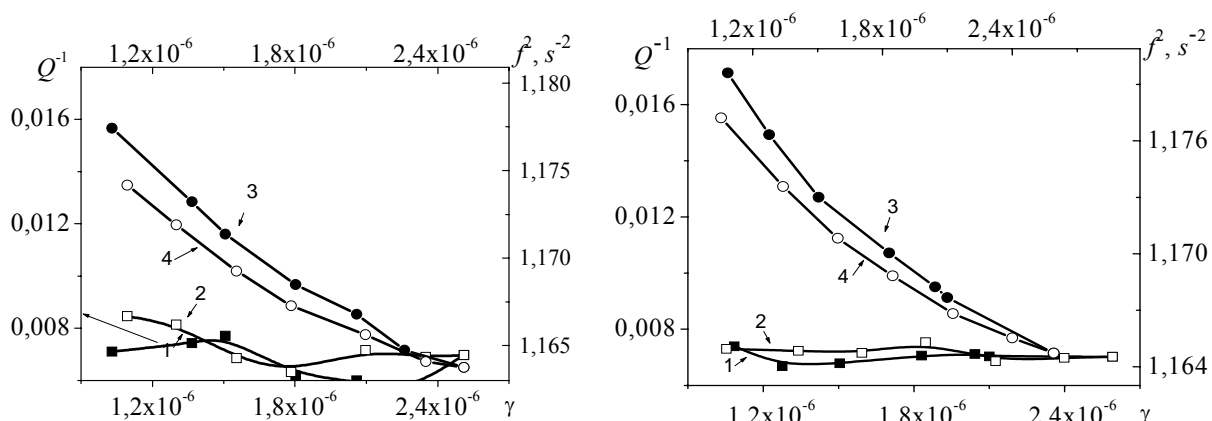


Рис. 3. Амплітудні залежності ВТ (1,2) і f^2 (3,4) в МТБК Ве в "інверсному" стані без магнітного поля (а) і в СМП (б). Криві 1, 3 виміряні при наростанні амплітуди деформації γ , 2, 4 – при зменшенні γ

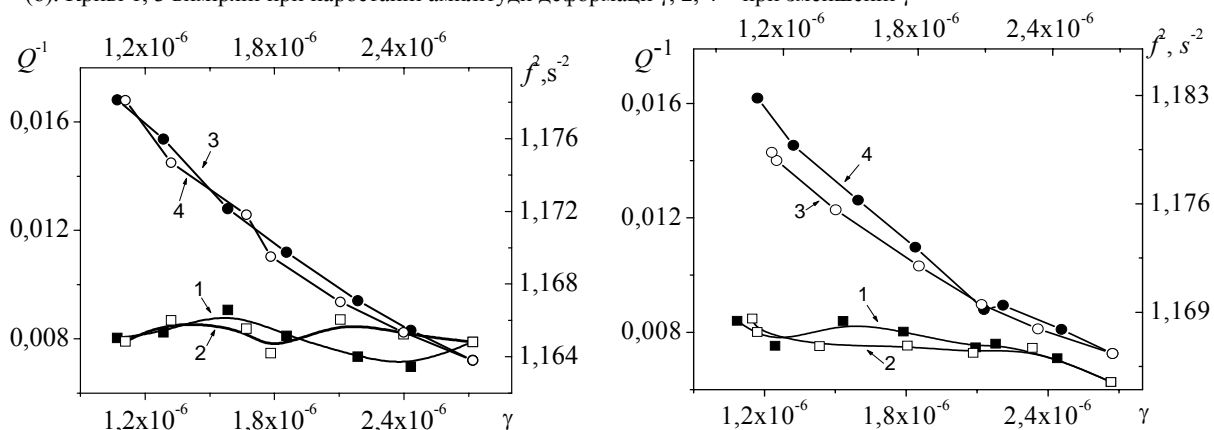


Рис. 4. Амплітудні залежності ВТ (1,2) і f^2 (3,4) в МТБК Ве при кімнатних температурах в "основному" структурному стані без СМП (а) і в магнітному полі (б). Криві 1, 3 виміряні при наростанні амплітуди деформації γ , 2, 4 – при зменшенні γ

Для кількісного аналізу впливу магнітного поля на пружні та непружні характеристики немагнітних матеріалів ми проаналізували деякі із сучасних моделей АЗВТ (Давиденкова, Асано, Гранато-Люкке, Бейкера) [5]. Серед них вибрали модель Бейкера, який запропонував простий алгоритм визначення середніх швидкостей руху дислокацій із даних амплітудно-залежного внутрішнього тертя і фактично показав зв'язок амплітудно-залежного декременту з дислокаційною деформацією. Він використав пропорційність декременту δ_h і дефекту модуля $(\Delta M / M)_h$:

$$\delta_h = r(\Delta M / M)_h, \quad (1)$$

(r – деякий постійний для даного матеріалу коефіцієнт), а також наближений вираз для дислокаційної деформації ε_{dm}

$$\varepsilon_{dm} = \varepsilon_0 \delta_h / r. \quad (2)$$

При коливаннях, що встановилися, швидкість дислокаційної деформації $\dot{\varepsilon}_d$ пропорційна до величини деформації ε_{dm} :

$$\dot{\varepsilon}_d = 4f_0 \varepsilon_{dm}, \quad (3)$$

де f_0 – частота коливань. Тоді середню швидкість руху дислокацій V_{av} можна отримати за допомогою відомого співвідношення Орована

$$\dot{\varepsilon}_d = \Lambda b V_{av}, \quad (4)$$

де Λ – густина дислокацій, b – модуль вектора Бюргерса.

Ця модель пов'язує дислокаційну деформацію з дефектом модуля пружності $\varepsilon_d = \varepsilon_0 \Delta M / M$, а швидкість зміни дислокаційної деформації

$$\dot{\varepsilon}_d = 4f_0 \varepsilon_d = 4f_0 \varepsilon_0 \Delta M / M = \Lambda b v_d, \quad (5)$$

з швидкістю руху дислокацій v_d під дією зовнішнього механічного поля.

Оцінка швидкості руху дислокацій під дією магнітного поля і за його відсутності за формулою

$$v_d = \left(4f_0 \gamma_0 \frac{\Delta G_{ef}}{G_{ef}} \right) / (\Lambda b) \quad (6)$$

показала, що дія магнітного поля *in situ* приводить до зростання середньої швидкості руху дислокацій у Ве в "інверсному" стані на 60 % у

порівнянні з рухом дислокацій без магнітного поля (до або після його дії) і до практичної відсутності (в межах точності експериментальних вимірювань) зміни швидкості руху дислокацій у стані, який називають "основним" (рис.5). При цьому зазначимо, що перехід в "основний" стан берилієвого конденсату в даних експериментах був ініційованим саме дією магнітного поля.

Природу зростання швидкості руху дислокацій під дією МП у Ве в "інверсному" стані можна пояснити з позицій теорії спин-залежних реакцій між нерівноважними структурними дефектами [1] (дивися схему на рис. 5.).

Згідно до цієї теорії відрив дислокацій від закріплюючих її стопорів під дією слабких магнітних полів можливий лише в сильно нерівноважних структурах за рахунок конверсії спинів дислокації і дислокаційного стопора. Після переходу системи "дислокація–дислокаційний стопор" у збуджений S^* -стан дії навіть дуже малого МП виявляється достатньо для конверсії спинів і переходу системи в T -стан, у якому навіть енергії теплових коливань ($\sim kT$) достатньо для депінінгу дислокацій і зростання швидкості їх руху під дією прикладених механічних полів.

Висновки

Пружні і непружні характеристики МТБК берилію при різних температурах під дією СМП зазнають відчутних змін, причому зміни зростають при підвищенні температури.

Поле величиною 0,03 Тл сприяє відкріпленню дислокацій від стопорів в "інверсному" стані Ве та зростанню швидкості їх руху в 1,6 рази у порівнянні з їх рухом без магнітного, але слабо впливає на рух дислокацій в "основному" стані, принаймні, при кімнатних температурах.

Кількісну оцінку швидкості руху дислокацій у немагнітних матеріалах під дією магнітних полів можна проводити на основі моделі Бейкера з використанням амплітудних залежностей ВТ і G_{ef} , що дозволяє віднести метод ВТ до ряду "прямих" методів дослідження спинових ступенів вільності нестабільних структурних дефектів.

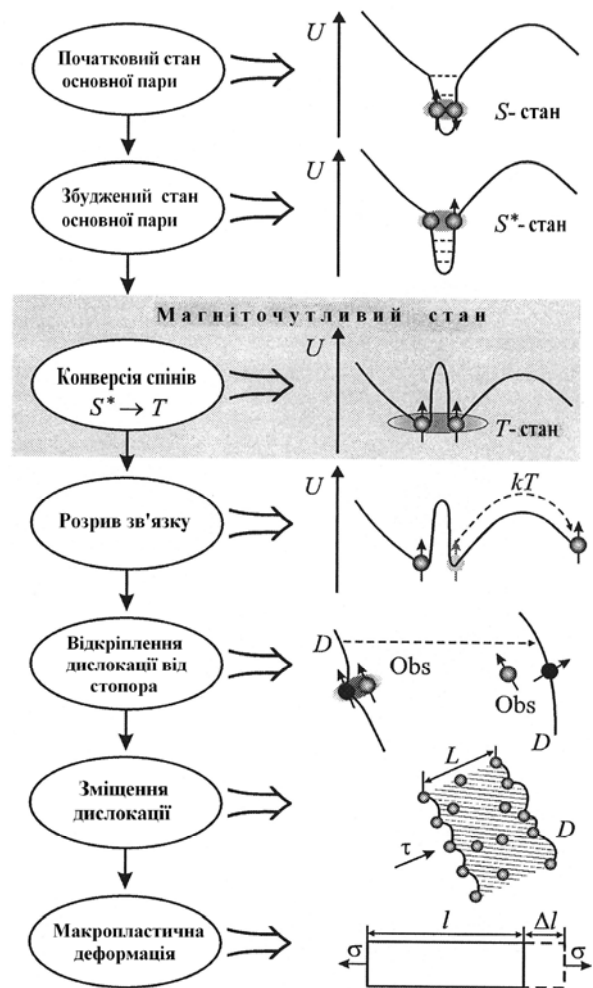


Рис. 5. Схематичне зображення механізму депінінгу дислокацій в немагнітних матеріалах під дією СМП [1].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головин Ю.И. // Магнитопластичность твердых тел (Обзор) // ФТТ. – 2004. – 46, №5. – С.769-803.
2. Молоцкий М.И. // ФТТ. – 1993. – 35, №1. – С.467-473.
3. Oleinich A.V., Raransky N.D., Strongin B.G. Behavior of effective shear modulus and internal friction during transition to the inverse state in Beryllium // Met. Phys. Adv. Tech. – 1997. – 16. – P.441-448.
4. Олійнич-Лисюк А.В., Раранський Н.Д. Про особливості формування "інверсного" стану в берилії різної чистоти // Металлофізика и новейшие технологии. 2006. – 28, №12. – С. 1661-1674.
5. Лебедев А.В. Амплитудно-зависимый дефект модуля упругости в основных моделях дислокационного гистерезиса // ФТТ. – 1999. – 41, №7. – P.1214-1221.