УДК 538.1

Ю.І. Горобець

ДИСЛОКАЦІЇ У ФЕРОМАГНЕТИКАХ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Вступ

Добре відомо, що магнітна структура, а також магнітні поля порівняно невеликі за розміром 10^2—10^3 Е можуть помітно впливати на пластичність та інші механічні властивості феромагнетиків [1—6]. Тому для пояснення таких ефектів пропонуються різні фізичні механізми. Зокрема, запропоновано механізми взаємодії дислокацій з доменними межами, гальмування рухомих дислокацій магнонами, що випромінюються [7], впливу магнітного поля на переходи (сінглет-триплет) між різними спіновими станами тощо [6, 8]. Обговорюється також роль магнітних моментів дислокацій при взаємодії їх з постійним магнітним полем [6, 9].

Постановка задачі

Мета даної статті — на основі феноменологічного підходу, який враховує енергію неоднорідного обміну і енергію магнітної анізотропії в околі кору дислокації, отримати вирази для магнітних сил, що діють на дислокації у феромагнетику в магнітному полі.

Магнітні сили, які діють на нерухому дислокацію у феромагнетику

Для оцінки сил, які діють на одиницю довжини дислокацій, що зумовлені гіротропними ефектами в магнітовпорядкованому середовищі, вважатимемо, що дислокація має додаткову густину енергії σ на одиницю її довжини. Ця додаткова густина енергії зумовлена неоднорідностями густини енергії магнітної анізотропії і неоднорідного обміну в околі кору дислокації. Додаткова лінійна густина енергії ділянки феромагнетика, де знаходиться елемент дислокації $d\mathbf{l}$, може бути записана у вигляді

$$\sigma = \int dx\,dy\,(\omega_{ag} + \omega_{lg} - \omega_a - \omega_l)\,, \qquad (1)$$

де ω_{ag},ω_a і ω_{lg},ω_l — густини енергії анізотропії і неоднорідного обміну феромагнетика при наявності дислокації і без неї, відповідно. Локально осі Ox і Oy вважаються ортогональними напрямку елемента дислокації $d\mathbf{l}$. Звичайно, це наближення можна застосовувати, якщо характерний розмір дислокаційної петлі D значно більший вектора Бюргерса $\mathbf{b}$. Як відомо, густини енергій анізотропії і неоднорідного обміну істотно залежать від локального розподілу намагніченості, яка, в свою чергу, залежить від зовнішнього магнітного поля. Суттєва зміна лінійної густини енергії $\sigma(l)$ залежно від зовнішнього магнітного поля $\mathbf{H}$ буде відбуватися при тих значеннях $\mathbf{H}$, коли в околі кору дислокації буде значно змінюватись розподіл намагніченості $\boldsymbol{\mu}$. Тому при значеннях зовнішнього магнітного поля, більших від поля насичення $H > H_S$, енергія σ не повинна залежати від величини магнітного поля H. Лінійна залежність енергії σ від магнітного поля H при $H > H_S$ може спостерігатись лише при врахуванні відмінностей значень намагніченостей насичення феромагнетика в околі кору дислокації і за її межами, відповідно. Поле насичення для феромагнетиків може визначатися магнітною анізотропією, коерцитивністю і розмагнічуючим фактором (формою зразка). Необхідно зазначити, що енергія σ може мати як додатне, так і від'ємне значення.

Для розрахунку магнітних сил $\mathbf{F}$, що діють на одиницю довжини дислокації у феромагнетику, розглянемо дислокаційну петлю D у феромагнетику з неоднорідним розподілом намагніченості $\boldsymbol{\mu}(\mathbf{r})$ і знайдемо аналогічно [10] зміну його енергії при нескінченно малому переміщенні петлі дислокації D.

Нехай $\delta\mathbf{x}$ — зміщення елемента лінії дислокації. Тоді зміну енергії можна подати у вигляді

$$\delta U = -\oint_D \mathbf{F}\delta\mathbf{x}\,d\mathbf{l}\,. \qquad (2)$$

Повну енергію дислокаційної петлі, зумовленої наявністю магнітної лінійної густини енергії, запишемо як

$$U = -\oint_D \sigma\,dl\,.$$

Якщо елемент дислокаційної лінії dl змістити на $\delta\mathbf{x}$, то прирощення площі матиме вигляд

$$\delta dS_i = e_{ikl}\,\delta X_k\,\tau_l\,dl\,,$$

де τ_l – одиничний вектор дотичної до лінії дислокації, $i = x, y, z$. Із врахуванням цього співвідношення можна отримати вираз

$$\delta U = \oint_D [\tau\times \mathrm{rot}(\sigma\tau)]\,\delta\mathbf{X}dl. \qquad (3)$$

Порівнюючи вирази (2) і (3), дістанемо вираз для магнітної добавки до сили, що діє на одиницю довжини дислокаційної петлі,

$$\mathbf{F} = \tau\times \mathrm{rot}(\sigma\tau)\,, \qquad (4)$$

який можна переписати в еквівалентному вигляді

$$\mathbf{F} = \sigma\tau\times \mathrm{rot}\tau - \tau(\tau\,\mathrm{grad}\sigma) + \mathrm{grad}\sigma. \qquad (5)$$

Перший доданок в (5) є сила, спрямована на зміну розміру дислокаційної петлі D через наявність додаткової лінійної густини магнітної енергії, другий доданок в (5) – сила, направлена вздовж дотичної до лінії дислокації, і третій доданок – сила, направлена вздовж напрямку найшвидшого зменшення енергії σ. Треба зазначити, що формули (4) і (5) не враховують магнітостатичні ефекти, які виникають через неоднорідний розподіл намагніченості в дислокаційній петлі D. Оскільки ж при малих характерних просторових масштабах зміни намагніченості порядку величини вектора Бюргерса, то роль енергії неоднорідного обміну значно перевищує магнітостатичні ефекти.

Характерними величинами, з якими зручно порівняти величини (1) і (4), є енергія Пайерлса і сила Пайерлса–Набаро для дислокації, відповідно.

Якщо оцінити величину (1) як

$$\sigma \simeq b^2\cdot K\,,$$

де K – константа магнітної анізотропії, а енергію Пайерлса у вигляді

$$U_P = \frac{b^2\sigma_n}{\pi}\,,$$

де $\sigma_n = 10^{-2}$–$10^{-5}\varsigma$, ς – модуль зсуву кристала, то відношення σ/U_P становитиме

$$\frac{\sigma}{U_P} \simeq \frac{\pi K}{\sigma_n}\,.$$

Наприклад, для заліза (типового феромагнетика) ця величина буде такою:

$$\frac{\sigma}{U_P} \simeq 1\text{–}10.$$

Для відношення величин відповідних сил матимемо

$$\frac{F}{F_{PN}} \simeq \frac{K}{\sigma_n}\frac{b}{l}\,, \qquad (6)$$

де l – характерний масштаб зміни магнітних характеристик поблизу ядра дислокації. Наприклад, якщо l – товщина доменної стінки, то

$$\frac{F}{F_{PN}} \simeq (0{,}1\text{–}1).$$

Отже, магнітна сила (1) може бути однаковою з силами, зумовленими наявністю бар'єрів Пайерлса.

Висновки

Таким чином, наявність локальної неоднорідності магнітної анізотропії і неоднорідності намагніченості в околі ядра дислокації може викликати значну зміну внутрішніх напружень у феромагнетику при його намагнічуванні. Особливо цей ефект помітний в області пластичної деформації кристала, де густина дислокацій значно зростає і досягає величин порядку 10^{11}–10^{12} см$^{-2}$. В цьому випадку середня відстань між дислокаціями буде відігравати роль характерної магнітної довжини l у формулі (6), а її величина досягне ширини доменної границі у феромагнетику і буде зумовлювати появу магнітних неоднорідностей того ж порядку, що й доменні границі.

Ю.И. Горобец

ДИСЛОКАЦИИ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассматриваются силы, которые действуют на дислокации в ферромагнетиках, обусловленные изменением энергий магнитной анизотропии и неоднородного обмена в области кора дислокации под действием внешнего магнитного поля. Показано, что в области пластической деформации эти силы магнитной природы одного порядка с силами Пайерлса.

Yu.I. Gorobets

DISLOCATIONS IN FERROMAGNETS IN A MAGNETIC FIELD

In the present paper, we discuss the forces that impact on dislocations in ferromagnets caused by change of magnetic anisotropy energies and non-uniform exchange near the core of dislocation under the influence of an external magnetic field. We show that these magnetic forces are of the same order as Peierls' ones in the area of plastic deformation.

1. *Zackay V.F., Hazlett T.H.* // Acta Metall. – 1953. – **1**. – P. 624.
2. *Фрашок В.А.* // ДАН БССР. – 1964. – **8**, № 4. – С. .
3. *Bolling C.F., Richman R.H.* // Phil. Mag. – 1969. – **19**. – P. 247.
4. *Hayashi S., Takahashi S., Yamamoto M.* // J. Phys. Soc. Japan. – 1971. – **25**, N 2. – P. 381.
5. *Wolfenden A.* // Z. Metall. – 1978. – **69**. – P. 308.
6. *Васильев М.А.* // Усп. физики металлов. – 2007. – **8**, № 1. – С. 65–105.
7. *Baryakhtar V.G., Druinskii E.T.* // Zh. Eksp. Teor. Fiz. – 1977. – **72**. – P. 218.
8. *Molotskii M., Fleurov V.* // Phil. Magaz. – 2003. – **83**, N 12. – P. 1421–1430.
9. *Ефимова Т.В., Полотнюк В.В.* // УФЖ. – 1981. – **26**, № 7. – С. 1149.
10. *Косевич А.М.* Теория кристаллической решетки. – К.: Вища шк., 1988.

Рекомендована Радою
фізико-математичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
6 листопада 2009 року