

05,07

Влияние гигантской магнитострикции на динамический предел текучести в условиях высокоскоростной деформации

© В.В. Малашенко

¹ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Украина

² Донецкий национальный университет, Донецк, Украина

E-mail: malashenko@donfti.ru

Поступила в Редакцию 16 июня 2021 г.

В окончательной редакции 2 августа 2021 г.

Принята к публикации 3 августа 2021 г.

Теоретически проанализирована высокоскоростная деформация материалов с гигантской магнитострикцией. Показано, что гигантская магнитострикция оказывает существенное влияние на динамический предел текучести функциональных материалов.

Ключевые слова: высокоскоростная деформация, динамический предел текучести, гигантская магнитострикция, дислокации.

DOI: 10.21883/FTT.2021.12.51667.148

Развитие современной науки и техники стремительно расширяет перечень процессов, инициирующих высокоскоростную деформацию функциональных материалов. Такая деформация реализуется в процессе изготовления и эксплуатации различных изделий и обусловлена высокоэнергетическими воздействиями на них (лазерное облучение, штамповка, ковка, резка, пробивание оболочек, ударно-волновое воздействие) [1–4]. Высокоскоростная деформация весьма существенно отличается от квазистатической. При высокоэнергетических воздействиях дислокации совершают надбарьерное движение. При этом механизм диссипации заключается в переходе энергии внешних воздействий в энергию дислокационных колебаний в плоскости скольжения. Эффективность такого механизма в значительной степени определяется условиями возникновения колебаний дислокации, в первую очередь наличием щели в спектре дислокационных колебаний. Щель в спектре возникает потому, что дислокация колеблется в потенциальной яме, движущейся вместе с дислокацией. Такая яма может возникнуть как в результате коллективного взаимодействия точечных дефектов с каждой движущейся дислокацией (вклад этого взаимодействия обозначим как Δ_d), так и в результате коллективного взаимодействия движущихся дислокаций ансамбля с каждой дислокацией (этот вклад обозначим Δ_{dis}). В кристаллах с гигантской магнитострикцией главный вклад в формирование щели вносит магнитоупругое взаимодействие (Δ_M). Такие материалы в настоящее время привлекают всё большее внимание исследователей [5,6]. Гигантскую магнитострикцию в области низких температур демонстрируют Tb, Dy, Ho, Er и ферриты-гранаты этих металлов (например, Tb₃Fe₅O₁₂). Их магнитострикция

на два-три порядка выше, чем магнитострикция в сплавах и ферритах группы Fe. При комнатных температурах такие значения магнитострикции можно получить, используя ферримагнитные соединения DyFe₂, TbFe₂, HoFe₂, DyFe₃.

Материалы с гигантской магнитострикцией широко используют в микросистемотехнике, их применяют для изготовления датчиков давления, сенсоров, гидролокаторов, антивибрационных систем, изготовления приводов для нанотехнологических операций. Так как эти материалы используются в разнообразных конструкциях, большое значение имеют их механические свойства, которые определяются зарождением и движением дислокаций, а также их взаимодействием с другими дефектами структуры. В условиях высокоэнергетических воздействий гигантская магнитострикция оказывает существенное влияние на динамику дислокаций, а, следовательно, и на механические свойства материалов, в частности, предел текучести. Анализ этого влияния посвящена настоящая работа.

Неупругие процессы, реализуемые в ходе высокоскоростной деформации, весьма успешно исследуются методом молекулярной динамики. Этот метод позволяет детально проанализировать преодоление дислокацией различных структурных дефектов, однако получить аналитическое выражение зависимости механических свойств различных функциональных материалов от их характеристик и условий деформации зачастую не представляется возможным. Получение таких зависимостей для целого ряда задач возможно в рамках развитой нами теории динамического взаимодействия структурных дефектов [7–10].

Скольжение краевой дислокации в ферромагнетике, содержащем хаотически распределенные точечные де-

фекты, может быть описано уравнением

$$m \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = b [\sigma_0 + \sigma_{xy}] - B \frac{\partial X}{\partial t}. \quad (1)$$

Функция $X(z, t)$ определяет положение дислокации массой m . Здесь σ_0 — постоянное внешнее напряжение, σ_{xy} — компонента тензора напряжений, создаваемых точечными дефектами, B — константа фононного демпфирования, c — скорость звука в деформируемом материале, b — модуль вектора Бюргера движущейся дислокации.

В рассматриваемом нами случае спектр дислокационных колебаний является нелинейным, он имеет щель и может быть описан выражением

$$\omega(p_z) = \sqrt{c^2 p_z^2 + \Delta^2}. \quad (2)$$

Вклад магнитоупругого взаимодействия в формирование щели в колебательном спектре дислокации, согласно [9], определяется выражением

$$\Delta_M^2 = \frac{B_M^2 b^2 \omega_M}{16 \pi m c_s^2} \ln \frac{\theta_c}{\varepsilon_0}. \quad (3)$$

Здесь $B_M = \lambda M_0$, M_0 — намагниченность насыщения, λ — константа магнитоупругого взаимодействия, $\omega_M = g M_0$, g — феноменологическая константа, равная по порядку величины гиромангнитному отношению для электрона, θ_c — температура Кюри, ε_0 и c_s — параметры магнетонного спектра. В случае кристаллов с гигантской магнитоэлектрической именно магнитоупругое взаимодействие может стать доминирующим при формировании спектральной щели, т.е. $\Delta = \Delta_M$. При этом на механические свойства таких материалов существенное влияние оказывают их магнитные характеристики. Вклад магнитоупругого взаимодействия превышает вклад коллективного взаимодействия точечных дефектов и дислокаций при выполнении следующих условий

$$\Delta_M > \Delta_d = \frac{c}{b} \sqrt[4]{n_0 \chi^2}, \quad \Delta_M > \Delta_{dis} = c \sqrt{\rho}. \quad (4)$$

Здесь χ — параметр несоответствия примесных атомов, ρ — плотность дислокаций, n_0 — безразмерная концентрация примесей.

В рамках теории динамического взаимодействия структурных дефектов [10] мы можем вычислить вклад примесей в величину динамического предела текучести кристалла по формуле

$$\tau = \frac{nb}{8\pi^2 m} \int d^3 p |p_x| |\sigma_{xy}(\mathbf{p})|^2 \delta\{p_x^2 v^2 - \Delta^2 - c^2 p_z^2\}, \quad (5)$$

где $\sigma_{xy}(\mathbf{b})$ — Фурье-образ компоненты тензора напряжений, создаваемых точечным дефектом, а интегрирование выполняется по всему пространству импульсов, n — объемная концентрация примесей, $n_0 = nb^3$.

При скоростях $v < v_0 = b \Delta_M$ динамическое торможение движущейся краевой дислокации примесными

атомами имеет квазивязкий характер, т.е. линейно возрастает с увеличением скорости дислокационного скольжения. В этой области скоростей вклад торможения дислокации атомами примесей в величину динамического предела текучести определяется следующим выражением

$$\tau = n_0 \chi^2 \mu \frac{c \dot{\varepsilon}}{\rho b^3 \Delta_M^2}. \quad (6)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}$ — скорость пластической деформации, μ — модуль сдвига.

Используя выражение для магнитоупругой щели, получим зависимость предела текучести от магнитных характеристик материала

$$\tau = K \frac{n \chi^2 \dot{\varepsilon}}{\lambda^2 M_0^3}, \quad K = \frac{16 \pi m \mu c c_s^2}{\rho b^2 g \ln \frac{\theta_c}{\varepsilon_0}}. \quad (7)$$

Оценим вклад примесных атомов в величину динамического предела текучести материалов с гигантской магнитоэлектрической. Воспользовавшись данными работ [5,6], получим, что магнитоупругая щель в таких соединениях имеет величину порядка $\Delta_M = 10^{12} \text{ s}^{-1}$. Для значений $b = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, $\chi = 10^{-1}$, $n_0 = 10^{-4}$, $\dot{\varepsilon} = 10^6 \text{ s}^{-1}$, $\rho = 10^{12} \text{ m}^{-2}$, $\mu = 5 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$, $c = 3 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ получим $\tau = 50 \text{ MPa}$, что составляет по порядку величины десятки процентов предела текучести интерметаллических соединений. Нетрудно убедиться, что условия доминирования вклада магнитоупругого взаимодействия в формирование спектральной щели (4) при таких значениях также выполняются.

Из формулы (3) следует, что увеличение константы магнитоэлектрической приводит к увеличению вклада магнитоупругого взаимодействия в величину спектральной щели. При этом вклад примесных атомов в предел текучести уменьшается с ростом константы магнитоэлектрической (формула (7)).

Полученные результаты применимы для интерметаллических соединений редкоземельных элементов с металлами группы железа, обладающими гигантской магнитоэлектрической.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что магнитные характеристики материалов с гигантской магнитоэлектрической оказывают существенное влияние на динамику дислокаций и механические свойства этих материалов в условиях высокоскоростной деформации.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G.I. Kanel, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. J. Appl. Phys. **127**, 035901 (2020). <https://doi.org/10.1063/1.5130703>
- [2] A.S. Savinykh, G.I. Kanel, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. J. Appl. Phys. **128**, 025902 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0009812>

- [3] D. Batani. *Europhys. Lett.* **114**, 65001(1-7). (2016).
DOI: 10.1209/0295-5075/114/65001
- [4] G.V. Garkushin, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, F.S. Savinykh. *Mech. Solids.* **52**, 4, 407 (2017).
<https://link.springer.com/article/10.3103/S0025654417040070>
- [5] Y. He, Y. Han, P. Stamenov, B. Kundys, J.M.D. Coey, C. Jiang, X. Huibin. *Nature* **556**, E5 (2018). DOI: 10.1038/nature25780
- [6] X. Li, X. Bao, Y. Xin, X. Gao. *Scr. Mater.* **147**, 64 (2018).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.004>
- [7] В.Н. Варюхин, В.В. Малашенко. *Изв. РАН. Сер. физ.* **82**, 9, 37 (2018). [V.N. Varyukhin, V.V. Malashenko. *Bull. Russ. Academ. Sci.: Phys.* **82**, 9, 1213 (2018)].
DOI: 10.3103/S1062873818090253
- [8] В.В. Малашенко. *Письма в ЖТФ* **46**, 18, 39 (2020). [V.V. Malashenko. *Tech. Phys. Lett.* **46**, 9, 925(2020)].
DOI: 10.1134/S1063785020090242
- [9] В.В. Малашенко. *Письма в ЖТФ* **38**, 19, 61 (2012). [V.V. Malashenko. *Tech. Phys. Lett.* **38**, 10, 898 (2012)].
DOI: 10.1134/S1063785012100070
- [10] В.В. Малашенко. *ФТТ* **61**, 10, 1845 (2019). [V.V. Malashenko. *Phys. Solid State* **61**, 1800. (2019)].
<http://dx.doi.org/10.21883/FTT.2019.10.48258.485>

Редактор Ю.Э. Китаев