

Механострикция

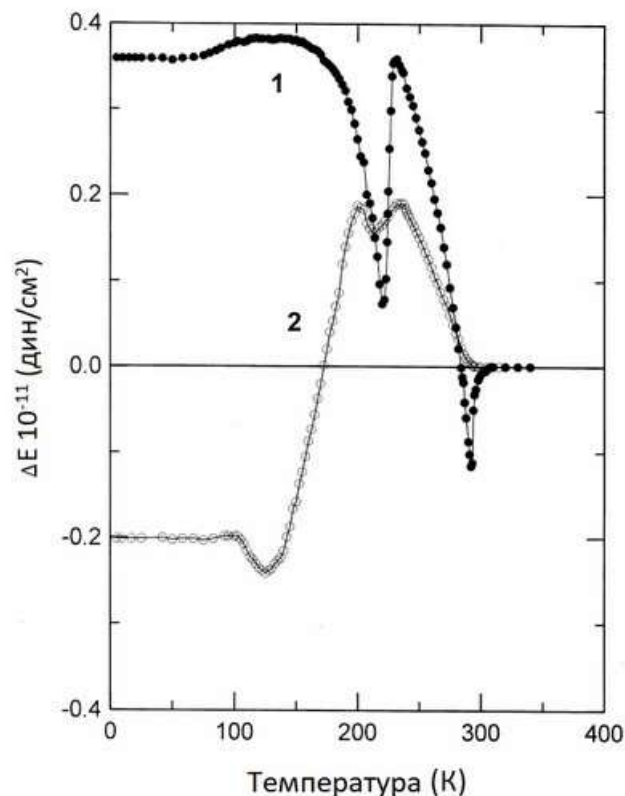
Механострикция (от греч. μηχανικός – механический, лат. strictio – сжатие, натягивание), возникновение дополнительной деформации магнитных материалов при наложении механических напряжений, которая обусловлена изменением магнитного состояния материала. Механострикция теоретически предсказана в 1933 г. в работах Н. С. Акулова и Е. И. Кондорского (Akulov. 1933), исследования были продолжены зарубежными физиками (например, Brown. 1937).

Механическое напряжение, наложенное на образец из магнитного материала (ферро-, ферри-, антиферромагнетик), обычно вызывает его деформацию: $\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_m$, где ε_u – упругая деформация, ε_m – дополнительная механострикционная деформация; $\varepsilon_m = (\delta l / l) m$, где l – длина образца, δl – изменение длины образца.

Механострикция имеет магнитострикционную природу. При воздействии на магнетик упругих напряжений в нём возникает механострикция даже в отсутствие внешнего магнитного поля, связанная как с процессами вращения и смещения доменов (техническое намагничивание), так и с парапроцессом (изменением обменного взаимодействия) (Белов. 1987). При наличии механострикции деформация (например, удлинение) образца оказывается непропорциональной механическому напряжению, что приводит к аномалиям модулей упругости магнетиков (наблюдается отклонение от закона Гука). Наиболее заметно механострикция проявляется в материалах, в которых упругая и магнитная подсистемы сильно взаимосвязаны.

Остаточные деформации, возникающие в процессе изготовления материала, а также деформации, появляющиеся при исследовании образца (например, зажатии образца при креплении), могут вызывать искажение основного (исследуемого) магнитного состояния материала.

Механострикция может только увеличивать общую деформацию. В ряде инваров и редкоземельных сплавов и соединений, особенно вблизи температур магнитных фазовых переходов, упругие деформации вызывают существенное изменение не только направления, но и величины спонтанной намагниченности, что вследствие объёмной магнитострикции в области парапроцесса может приводить к добавочной механострикции (Tishin. 1999).



Температурные зависимости магнитных вкладов в ΔE-эффект высокочистого гадолиния: кривая 1 – вдоль оси с, кривая 2 – вдоль оси b. График из статьи: Spichkin Y. I., Tishin A. M., Gschneidner K. A. Jr. Elastic properties of a high purity gadolinium single crystal // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1999, V. 204, P. 5–10. Перевод подписей и обозначения: БРЭ.

С механострикцией непосредственно связан ΔE-эффект – зависимость модуля упругости E (модуля Юнга) магнитных материалов от величины внешнего магнитного поля. Существование механострикции обуславливает в ферромагнитных материалах аномальное поведение модулей упругости, особенно в области магнитных фазовых переходов. Так, в никеле и пермаллое аномалии модуля Юнга связаны с механострикцией, возникающей за счёт ориентации векторов спонтанной намагниченности. ΔE-эффект описывается выражением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{(\delta l/l)_M}{(\delta l/l)_0}, \quad (1)$$

где $(\delta l/l)_M$ – механострикция, а $(\delta l/l)_0$ определяет величину $E_0 = p(\delta l/l)_0$ – истинный модуль упругости (p – упругое напряжение) (Белов. 1987). Чем больше величина механострикции, тем более выраженным является ΔE-эффект, и эта взаимосвязь наиболее чётко проявляется в никеле (Engler, 1938). Характер температурных зависимостей и знак ΔE-эффекта существенно зависит от кристаллографического направления. На рисунке представлены температурные зависимости магнитных вкладов в ΔE-эффект высокочистого

гадолиния (Spichkin. 1999). Как видно, вдоль кристаллографической оси с (кривая 1) ΔE -эффект кристалла отрицателен, в точке Кюри ($T_C=295$ K) он меняет знак и при дальнейшем охлаждении положителен, в то время как вдоль кристаллографической оси b (кривая 2) ΔE -эффект имеет положительную величину до температуры 170 K, а затем становится отрицательным.

В ряде магнитоупорядоченных веществ, например в SmFe_2 (Magnetoelasticity in SmFe_2 . 1974; Magnetic anisotropy ... 1999), TbFe_2 (Clark. 1972), было обнаружено уменьшение модуля упругости (аномальный ΔE -эффект) в слабых магнитных полях.

Основным возможным применением материалов, обладающих механострикцией, являются разнообразные магнитоупругие датчики, которые позволяют проводить контроль и измерение величин дополнительных деформаций, напряжений и т. п. по измерению магнитных характеристик вещества.

Зверев Владимир Игоревич, Тишин Александр Метталинович

Библиография:

- Akulov N. Über Mechanostriktion und δE -Effekt / N. Akulov, E. Kondorsky // Zeitschrift für Physik. – 1933. – Bd. 85. – S. 661–671.
- Brown W. F. Jr. Domain theory of ferromagnetics under stress. Part 1 // Physical Review. – 1937. – Vol. 52, № 4. – P. 325–334.
- Engler O. Der Elastizitätsmodul ferromagnetischer Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Magnetfeld // Annalen der Physik. – 1938. – Bd. 423, № 2. – S. 145–163.
- Clark A. E. Giant room-temperature magnetostrictions in TbFe_2 and DyFe_2 / A. E. Clark, H. S. Belson // Physical Review B. – 1972. – Vol. 5, № 9. – P. 3642–3644.
- Magnetoelasticity in SmFe_2 / M. Rosen, H. Klimker, U. Atzmony, M. P. Dariel // Physical Review B. – 1974. – Vol. 9, № 1. – P. 254–258.
- Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – Москва : Наука, 1987. – (Проблемы науки и технического прогресса).
- Magnetic anisotropy and magnetostriction of SmFe_2 crystal / H. Samata, N. Fujiwara, Y. Nagata [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – Vol. 195, № 2. – P. 376–383.
- Spichkin Y. I. Elastic properties of a high purity gadolinium single crystal / Y. I. Spichkin, A. M. Tishin, K. A. Gschneidner, Jr. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – Vol. 204, № 1. – P. 5–10.
- Tishin A. M. Static and Dynamic stresses / A. M. Tishin, Y. L. Spichkin, J. Bohr // Handbook on the physics and chemistry of rare earths / ed. by K. A.

Gschneidner, Jr., L. Eyring. – Amsterdam : North-Holland, 1999. – Vol. 26. – P. 87–176.