

## Магнитострикционные материалы

**Магнитострикционные материалы**, материалы, обладающие хорошо выраженными магнитострикционными свойствами.

К классическим и первым по времени открытия магнитострикционным материалам (условно первая группа магнитострикционных материалов) относятся металлы, сплавы и соединения на основе элементов группы железа и никеля (т. н. инварные сплавы). Магнитострикция была открыта Дж. П. Джоулем в 1842 г. Он обнаружил, что железный стержень при намагничивании изменяет свои размеры. Магнитострикция никеля впервые была измерена У. Ф. Барреттом в 1882 г. Ш. Э. Гильом в 1896 г. установил, что в некоторых сплавах железа и никеля наблюдается положительная магнитострикция (удлинение образца), и разработал сплав инвар (Ni 36 %, Fe 64 %) с уникально низким коэффициентом теплового расширения. Интенсивное исследование магнитострикционных явлений, особенно в сплавах на основе железа и никеля, началось в 30-х гг. 20 в. Магнитострикционные сплавы на основе никеля использовались в акустических преобразователях во время Второй мировой войны. К основным магнитострикционным материалам данной группы относятся чистые железо, кобальт, никель, а также ряд их сплавов: 50 % Co, 50 % Fe; 70 % Co, 30 % Fe; 10 % Ni, 90 % Fe; 45 % Ni, 55 % Fe; 54 % Pt, 46 % Fe (Белов. 1987). В некоторых сплавах группы железа магнитострикция  $\Delta l/l \sim 10^{-4}$ , что существенно превышает её величины в железе и никеле ( $\Delta l/l \sim 10^{-6}$ ). К наиболее известным магнитострикционным материалам этого класса относятся алфер, пермендюр; они самые дешёвые. Однако малые величины магнитострикции таких материалов заметно сдерживают их широкое применение в технике.

Ко второй группе магнитострикционных материалов относятся магнитомягкие материалы – поликристаллические и аморфные сплавы на основе железа, кобальта и никеля с большими значениями коэффициента линейного теплового расширения (ковар, платинит). Они обладают невысокими значениями магнитострикции насыщения ( $(\Delta l/l)_H < 5 \cdot 10^{-5}$ ). Наиболее важным материалом из этой группы является аморфный сплав метгласс 2605SC ( $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ ), спонтанная магнитострикция которого равна  $3 \cdot 10^{-5}$  при 300 К). Из-за особенностей технологии изготовления сплав выпускается только в форме тонких лент.

Третья группа магнитострикционных материалов включает в себя магнитострикционные сплавы с высокими значениями намагниченности насыщения. В 1960-х гг. гигантские величины магнитострикции ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ ) были обнаружены в редкоземельных металлах (РЗМ) тербии и диспрозии (Clark. 1965) при низких температурах. Однако их точки Кюри лежат в области низких температур, и при комнатной температуре эти металлы имеют незначительную магнитострикцию. В попытке получить большие величины

магнитострикции при комнатных температурах был открыт новый класс редкоземельных интерметаллических соединений типа  $RFe_2$  ( $R = PЗМ$ ) с магнитострикцией порядка  $2 \cdot 10^{-3}$  при 300 К, например  $TbFe_2$  и  $DyFe_2$  (Clark, 1980). Оба сплава обладают значительной магнитокристаллической анизотропией, и, следовательно, максимальные значения магнитострикции могут быть получены только в сильных магнитных полях. Тем не менее, подобрав правильную пропорцию Tb и Dy (Abbundi, 1977), можно уменьшить магнитокристаллическую анизотропию. Такой подход привёл к открытию сплава  $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$  (коммерчески известного как терфенол-Д). Данное соединение со структурой фазы Лавеса [1] наиболее перспективно из-за гигантской магнитострикции (10–2) при комнатной температуре и малой величины магнитокристаллической анизотропии, что позволяет применять его в относительно слабых магнитных полях. Этот материал применяется в гидролокаторах и магнитострикционных силовых приводах.

Гигантская магнитострикция также обнаружена в  $RCu_2$  и  $RCu$  ( $R = PЗМ$ ) и в магнитокалорическом материале  $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$  (Morellon, 2000).

К другим магнитострикционным материалам на основе PЗМ со значительными величинами магнитострикции относятся сверхпроводящие антиферромагнетики типа  $RNi_2B_2C$ , где  $R = Gd, Dy, Ho, Er$  ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ );  $RB_6$  ( $R = Ce, Nd, Gd$ ) ( $\sim 10^{-6} - 10^{-4}$ ); полуметаллические монониктиды церия  $CeBi$ ,  $CeSb$ ,  $CeP$  ( $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ ); соединения  $Ce(Ru_{0.85}Rh_{0.15})_2Si_2$  ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ ),  $CeAl_2$  ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ );  $RGa_2$  ( $R = Er, Ho, Dy$ ) ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ );  $ErIn_3$  ( $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ );  $TmS$  ( $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ ).

Среди магнитострикционных материалов, не содержащих PЗМ, необходимо выделить сплав железа и галлия (галфенол) (Clark, 2003). Данный магнитострикционный материал обладает приблизительно в 3 раза меньшим значением магнитострикции, чем терфенол-Д, при этом для достижения максимальных значений магнитострикции необходимо рекордно низкое значение магнитного поля (около 100 Э). Галфенол более вязок, демонстрирует высокий предел прочности (до 500 МПа) и может быть подвергнут механической обработке, сварке и использован в условиях, при которых терфенол-Д разрушается (при температуре от  $-20$  до  $+80$  °С). Сплавы данного типа (как правило, с содержанием галлия менее 20 %) обладают высокими температурой Кюри (675 °С) и коррозионной стойкостью. Исходные материалы для приготовления сплава, как правило, недороги.

На основе галфенола разработаны магнитострикционные материалы с частичной заменой галлия другими элементами, например бериллием; сплавы типа  $Fe - Ga - X$ , где  $X = Ni, Mo, Sn, Al$ . Также для увеличения значения намагниченности и повышения температуры Кюри при сохранении магнитострикционных свойства в сплавах типа галфенола железо может быть частично заменено кобальтом. Небольшие добавки углерода незначительно повышают магнитострикцию галфенола.

Важным фактором при разработке новых магнитострикционных материалов является оптимизация соотношения значений магнитострикции и магнитной анизотропии для получения больших величин растяжения/сжатия в

относительно небольших магнитных полях. Для объёмных материалов данная проблема была частично решена в описанных выше соединениях (в сплавах типа  $RFe_2$  с фазами Лавеса исчезает константа анизотропии второго порядка, а в сплавах на основе терфенола-Д – константа анизотропии четвёртого порядка).

В отдельную подгруппу можно выделить тонкие и аморфные плёнки, а также обменно-связанные многослойные структуры (мультислои), в которых возможно сочетание магнитомягких и магнестрикционных свойств. К тонким и аморфным плёнкам, как правило, относят соединения TbFe, TbCo, TbFeCo, TbDyFeCo, TbDyFe (Speliotis. 2013); SmFe, SmFeB; FeGa, FeGaB (Stadler. 2018); FeAl (алфенол Fe<sub>8</sub>Al<sub>19</sub>); FeCo. Эти материалы проявляют необычные для объёмных материалов магнитные свойства, в частности поверхностную магнестрикционную деформацию.

Среди мультислоёв можно выделить FeGa/NiFe. Магнестрикционные свойства галфенола могут быть улучшены путём обменного взаимодействия, возникающего в многослойных магнитных тонких плёнках, когда толщина плёнки меньше радиуса обменного взаимодействия. Большие значения магнестрикции достигаются в мультислоях галфенола в сочетании с тонкими плёнками Fe<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>, в которых наблюдаются высокие значения магнитной проницаемости, намагниченности насыщения и низкая коэрцитивность (Shi. 2019). Мультислои TbCo/FeCo и TbFe/Fe обладают гигантскими величинами магнестрикции, большими, чем у терфенола (Ludwig, 2000). Возможное объяснение этого явления связано с тем, что данные композитные материалы состоят из двух частей, одна из которых обладает большой магнестрикцией, а другая является магнитомягким материалом и обладает большой намагниченностью. Гигантские величины магнестрикции также наблюдаются и в магнитных наночастицах такого же состава (Sajja. 2016).

К четвёртой группе магнестрикционных материалов относятся ферриты со структурой шпинели  $MeFe_2O_4$  (Me = Mn, Zn, Co, Ni), гексаферриты, ферриты со структурой граната  $R_3Fe_5O_{12}$  (R = PЗМ); ортоферриты  $RFeO_3$  (R = PЗМ), оксиды марганца со структурой перовскита  $R_{1-x}MexMnO_3$ , (R = PЗМ; Me = Ca, Sr, Pb, Ba) и актинидные соединения (соединения урана, плутония, нептуния). Магнестрикционные материалы применяют в качестве преобразователей электромагнитной энергии в другие виды, например в механическую или акустическую. Они используются в излучателях и приёмниках звука, фильтрах, стабилизаторах и других селективных частотных устройствах для радиотехники и электросвязи, в линиях задержки звуковых и электрических сигналов, в магнитоупругих датчиках и магнестрикционных механизмах микроперемещений и нажимных устройствах.

Зверев Владимир Игоревич, Тишин Александр Метталинович

## Библиография:

- Clark A. E. Anomalous thermal expansion and magnetostriction of single-crystal dysprosium / A. E. Clark, B. F. DeSavage, R. Bozorth // *Physical Review*. – 1965. – Vol. 138, № 1A. – P. A216–A224.
- Abbundi R. Anomalous thermal expansion and magnetostriction of single crystal Tb<sub>27</sub>, Dy<sub>73</sub>, Fe<sub>2</sub> / R. Abbundi, A. Clark // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1977. – Vol. 13, № 5. – P. 1519–1520.
- Clark A. E. Magnetostrictive rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds // *Handbook of Ferromagnetic Materials*. – 1980. – Vol. 1. – P. 531–589.
- Extraordinary magnetoelasticity and lattice softening in bcc Fe-Ga alloys / A. E. Clark, K. B. Hathaway, W. Wun-Fogle, J. B. Restorff // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93, № 10. – P. 8621–8623.
- Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. – Москва : Наука, 1987. – (Проблемы науки и технического прогресса).
- Ludwig A. Giant magnetostrictive thin films for applications in microelectromechanical systems / A. Ludwig, E. Quandt // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 87, № 9. – P. 4691–4695.
- Nature of the first-order antiferromagnetic-ferromagnetic transition in the Gericke magnetocaloric compounds Gd<sub>5</sub>(SixGe<sub>1-x</sub>)<sub>4</sub> / L. Morellon, J. Blasco, P. A. Algarabet, M. R. Ibarra // *Physical Review. Serie B*. – 2000. – Vol. 62, № 2. – P. 1022–1026.
- Speliotis T. Extraordinary magnetization of amorphous TbDyFe films / T. Speliotis, D. Niarchos // *Microelectronic Engineering*. – 2013. – Vol. 112. – P. 183–187.
- Magnetostrictive cobalt ferrite, nanoparticles preparation and magnetic characterization / M. Sajjia, M. Hasanuzzaman, A. Ghani Olabi, A. Barutaji // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. – 2015.
- Galfenol Thin Films and Nanowires / B. J. H. Stadler, M. Reddy, R. Basantkumar [et al.] // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, № 8. – Art. 2643.
- A study of high piezomagnetic (Fe-Ga/Fe-Ni) multilayers for magnetoelectric device / J. Shi, M. Wu, W. Hu [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 806. – P. 1465–1468.