

К ВОПРОСУ О РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.П. Тютнев, В.В. Сергеев,
В.Т. Семёнов, Г.П. Станолевич
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Рассмотрен вопрос о радиационной стойкости постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов. Проанализированы результаты наземных испытаний, посвящённых воздействию дестабилизирующих факторов космического пространства на редкоземельные магниты, приведены зависимости магнитной индукции от нейтронного потока для двух типов постоянных магнитов Sm – Co и Nd – Fe – B, отличающихся температурой Кюри.

Ключевые слова: постоянные магниты на основе редкоземельных элементов, остаточная индукция, радиационная стойкость.

Воздействие ионизирующих излучений (гамма-квантов, тепловых и быстрых нейтронов, электронов и протонов космических излучений) на электротехнические материалы сопровождается деградацией их физико-химических (прочности на разрыв, удлинения при разрыве, модуля Юнга, эластичности) и электрофизических (пробивного напряжения, электропроводности, тангенса угла диэлектрических потерь) характеристик. Повреждающий эффект определяется энергией, поглощаемой облучаемым материалом (в расчёте на единицу массы), т. е. поглощённой дозой.

Основная доля (до 90 – 98 %) поглощённой энергии идёт на ионизацию и возбуждение атомов и молекул среды (в конечном счёте на радиационный нагрев материала) и только незначительная доля расходуется на смещение самих атомов в кристаллах или стеклах, создавая разупорядоченные области. Ионизационные потери энергии (поглощённая доза) полностью определяют повреждающий эффект в органических материалах (в первую очередь, в полимерах). Неорганические материалы (кристаллы, стекла, магниты) обладают значительно более высокими порогами повреждения, а деградация их свойств вызывается структурными дефектами решётки, т. е. энергией излучения, расходуемой на смещение атомов облучаемого материала. Обратимые эффекты при облучении (наведённая электропроводность, возрастание тангенса угла диэлектрических потерь, наведённое оптическое поглощение, ползучесть) во всех материалах определяются поглощённой дозой.

Характер возникающих радиационных нарушений в магнитном материале определяется, помимо структуры решётки, природой и энергией бомбардирующих частиц. Если энергия E' , передаваемая атому решётки от налетающей частицы равна, незначительно превышает пороговую энергию смещения атома E_d , то следует ожидать, в основном, обра-

зования простых изолированных дефектов типа пар Френкеля (вакансий и междоузельных атомов) и сложных комплексов «простой дефект + химическая примесь». Когда же эта энергия достаточно велика ($E_a \gg E_d$, где E_a – энергия атома), то первично смещённый атом способен создать целый каскад вторичных, третичных и т. д. смещений. Ряд экспериментов, действительно, показывает, что при облучении магнитных материалов быстрыми нейтронами и тяжёлыми заряженными частицами высоких энергий наряду с изолированными дефектами, которые в основном создаются электронами с энергией до 10 МэВ и γ -квантами, могут образовываться скопления простых дефектов в ограниченном объёме кристалла, так называемые разупорядоченные области – кластеры.

Наиболее эффективными в смысле образования атомов смещения являются нейтроны. Эти частицы лишены электрического заряда и их взаимодействие с атомами решётки можно рассматривать в первом приближении как столкновение твёрдых шаров. В среднем атом решётки приобретает энергию $E' \approx 2A^{-1}E$, где A – массовое число атома (≥ 20). Однако в космосе нейтроны практически отсутствуют.

Протоны, как заряженные частицы, испытывают сильное взаимодействие с электронами атомов и значительная доля энергии тратится на преодоление кулоновского взаимодействия налетающего протона с валентными электронами. В результате средняя энергия, передаваемая атомам вещества, значительно уменьшается: $E' \approx E_d \ln[4E/AE_d]$ (как и раньше $A \geq 20$) [1]. Принимая $E_d = 30$ эВ, найдём, что нейтрон с энергией 1 МэВ создаст в кобальте ($A = 59$) приблизительно 1100 смещённых атомов, в то время как даже протон с энергией 100 МэВ в этих же условиях приведёт к образованию только 110 смещённых атомов. На их образование уйдёт только 3,3 кэВ (т. е. только 0,03% переданной среде энергии при полной остановке протона).

Остальная часть энергии пойдёт на ионизацию атомов вещества и, в конце концов, перейдёт в тепло и нагрев материала. В случае электронов образуется всего пять смещённых атомов. Гамма-кванты столь же неэффективны для образования смещённых атомов, как и электроны.

Как мы увидим ниже, требуется учитывать радиационный разогрев образца магнита, поскольку в ходе испытаний может быть превышена температура Кюри, что приведёт к размагничиванию материала. В качестве справки укажем, что радиационный разогрев кобальта от поглощённой дозы 1 Мрад в адиабатических условиях составляет приблизительно 24 К. В связи с этим при проведении длительных испытаний магнитов необходимо обеспечить хорошее термостатирование образцов в каналах реактора (предпочтительнее всего с использованием проточной дистиллированной воды).

При нейтронном облучении первоначально образуется широкий набор вторичных частиц (протонов, α -частиц, тяжёлых ядер отдачи), которые в дальнейшем производят ионизацию и возбуждение молекул. Важным является то, что в отличие от других типов излучений нейтроны передают свою энергию исключительно посредством взаимодействия с ядрами атомов мишени.

При нейтронном облучении материалов поглощённая энергия обусловлена следующими вторичными частицами:

- ядрами отдачи, возникающими при упругом соударении нейтронов с веществом (существенно для быстрых нейтронов);
- протонами и α -частицами (n, p) и (n, α -реакций);
- наведённой активностью;

Величина поглощённой дозы на единичный поток нейтронов, 10^{-10} рад·см²/нейтрон [2]

Элемент	Энергия нейтрона, МэВ						
	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
F	1,10	0,39	0,65	1,10	3,1	4,5	7,7
Mg	0,25	0,35	0,77	0,83	1,9	3,2	1,9
Al	0,15	0,22	0,43	0,64	1,7	2,7	4,2
Si	0,02	0,50	0,35	1,04	1,1	2,8	4,1
S	0,13	0,18	0,19	0,47	1,0	2,10	1,6
CL	0,02	0,06	0,16	0,33	0,9	2,0	3,0
Ca	0,01	0,02	0,11	0,23	0,5	1,1	2,3
Fe	0,02	0,05	0,09	0,13	0,3	0,7	1,0

– ядрами отдачи, возникающими при испускании вторичного излучения.

Вклад каждого из указанных процессов в величину поглощённой дозы зависит от энергии нейтрона, состава облучаемого материала и геометрии эксперимента, а в случае наведённой активности также и от времени облучения. В таблице приведены справочные данные, необходимые для расчёта поглощённой дозы для нейтронов различной энергии.

В настоящее время широкое распространение в космической технике получили постоянные магниты на основе редкоземельных элементов типа Sm – Co или Nd – Fe – В. Они обладают рекордными техническими характеристиками. Коэрцитивная сила H_c до 900 кА/м ($\approx 11\ 000$ Э), остаточная индукция B_r до 1,5 Тл (15 000 Гс) и энергетическое произведение $(HB)_{max}$ до 350 кДж/м³, причём у магнитов второй группы эти характеристики систематически выше на 5 – 10 %.

Однако Nd – Fe – В магниты существенно уступают Sm – Co по своей температурной стойкости, так как температура Кюри для первых значительно (более чем на 150°) ниже, чем у вторых. Лучшие из Nd – Fe – В магнитов имеют максимальную рабочую температуру 150°С, в то время как магниты Sm – Co работоспособны до 350°С. Кроме температуры, значительное влияние на их работоспособность оказывают такие факторы космического пространства как вакуум и ионизирующие излучения естественного, но в основном, техногенного происхождения, например, при использовании реакторной установки на борту космического аппарата.

Ниже будут проанализированы результаты наземных испытаний, опубликованные в литературе [3, 4].

На рис. 1 показана типичная кривая снижения остаточной индукции B_r для наиболее термостойкого Sm – Co магнита, и влияние на этот процесс специального защитного покрытия. То же самое наблюдается и при испытаниях в вакууме (рис. 2). Причина потери B_r в вакууме (и в меньшей степени на воздухе) состоит в диффузионном выходе атомов Sm из магнита.

Давление насыщенных паров самария при 300, 400, 500 и 600 °С составляет 10^{-10} , 10^{-7} , 10^{-5} и 10^{-4} мм рт. ст. соответственно. Указывается, что нанесение на поверхность магнита защитного покрытия, играющего роль барьера для диффузии атомов Sm наружу, абсолютно необходимо для обеспечения 10-летнего срока работоспособности таких магнитов при температуре 400°С в вакууме 10^{-5} мм рт. ст или выше.

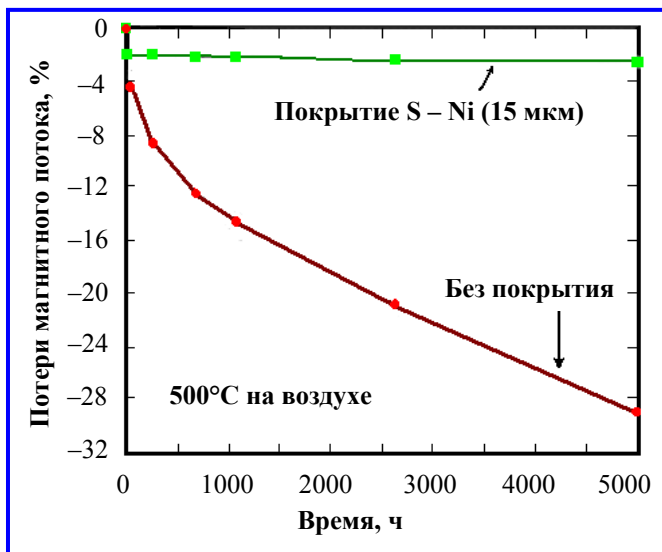


Рис. 1. Снижение B_r (в % от исходного) для магнитов серии Sm – Co T500 при 500°C на воздухе (верхняя кривая с 15 мкм покрытием из S – Ni, нижняя – без покрытия)

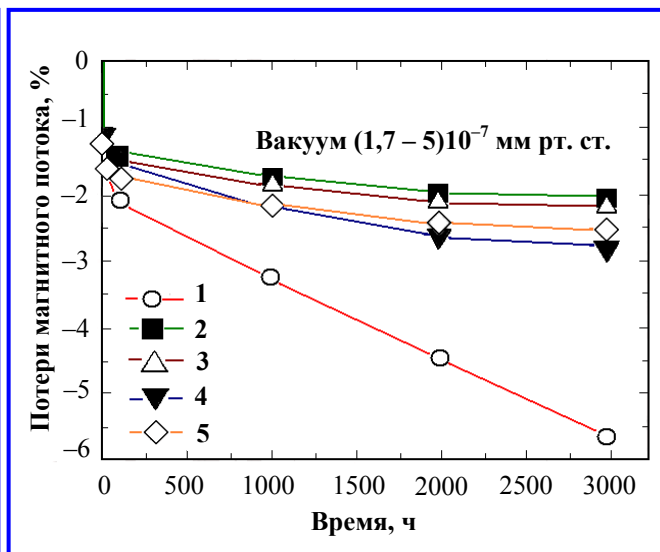


Рис. 2. Снижение B_r (в % от исходного) для магнитов серии Sm – Co T500 при 400°C в вакууме $3 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. (верхние кривые с покрытием, нижняя – без него)

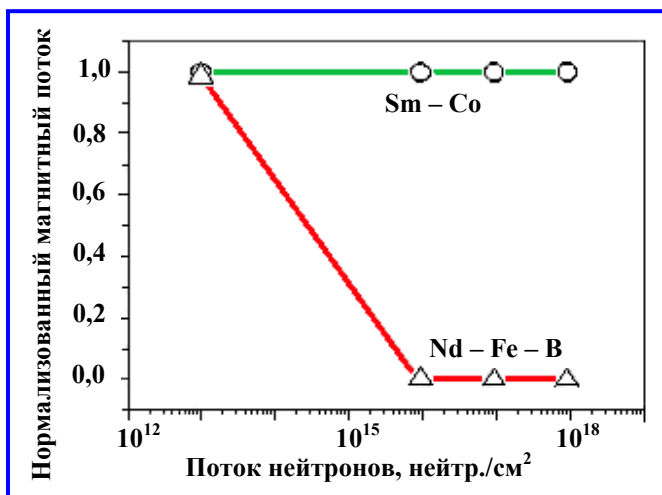


Рис. 3. Влияние нейтронного излучения на магнитную индукцию обоих типов магнитных материалов (в о. е.). Флюенс быстрых нейтронов дан в нейтр./см²

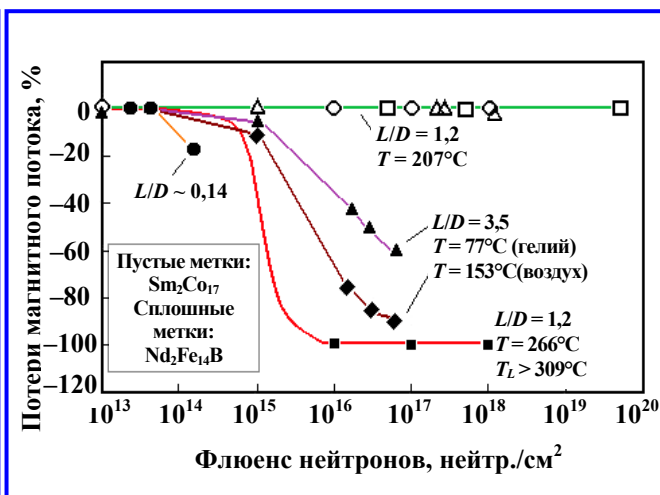


Рис. 4. Влияние нейтронного излучения на магнитную индукцию обоих типов магнитных материалов (в о. е.). Верхняя кривая относится к Sm – Co магнитам, три нижние – к Nd – Fe – В, из них верхняя получена при температуре в облучательном канале 77°C (атмосфера гелия), средняя 153°C (воздух) и нижняя 266°C (воздух)

Наиболее опасным видом ионизирующих излучений для рассматриваемых магнитов является нейтронное излучение, так как именно нейтроны приводят к разрушению кристаллической структуры магнитного материала. В связи с этим основной объём испытаний выполнен на исследовательских реакторах при тепловой мощности порядка 500 кВт. Однако полученные результаты (рис. 3, 4) требуют осторожности при их интерпретации.

Оказывается, что в ходе испытаний никаких специальных мер по охлаждению образцов магнитов не предпринималось, и их температура приближалась к температуре Кюри для Nd – Fe – В магнитов (310°C), что возможно и являлось основной причиной наблюдаемой деградации их свойств. Для Sm – Co магнитов температура Кюри существенно выше (820°C), и температурная деградация не могла играть никакой роли. Таким образом, можно заключить, что радиационная стойкость Sm – Co магнитов не ниже

10^{18} нейтр./см². Вопрос о радиационной стойкости Nd – Fe – В магнитов по результатам описанных испытаний должен считаться открытым.

Существенного прогресса в интерпретации испытаний Nd – Fe – В магнитов, выполненных на исследовательских реакторах, удалось добиться, когда были проведены специальные эксперименты, нацеленные на выяснение роли радиационного нагрева испытываемых образцов.

Снижение плотности потока быстрых нейтронов (энергия 0,01 – 10 МэВ) с $2 \cdot 10^{13}$ нейтр./(см²·с) до $4 \cdot 10^{12}$ нейтр./(см²·с) позволило заметно снизить потери магнитной индукции при одном и том же флюенсе 10^{16} нейтр./см² (температура, зарегистрированная термопарами, вмонтированными в образец, при этом снизилась почти на 60°C). В другой серии экспериментов произвели замену воздуха на гелий, при пассивном режиме охлаждения образца (принудительное охлаждение образцов с целью поддержания постоянной температуры никогда не применялось) также резко замедлилась скорость деградации магнитной индукции в связи с улучшением условий охлаждения редкоземельных элементов. Опять же это связано с более низкой температурой радиационного разогрева при наличии гелиевой атмосферы, поскольку теплопроводность гелия заметно выше, чем у воздуха. И наконец, самое главное. Даже после полного исчезновения остаточной индукции, перемагничивание этих образцов показало, что необратимая потеря работоспособности Nd – Fe – В магнитов по параметру B_r не превысила 7% даже

при флюенсе 10^{18} нейтр./см².

Все указанные выше факты однозначно свидетельствуют о том, что радиационная стойкость Nd – Fe – В магнитов тоже очень высока, хотя она и несколько ниже, чем у Sm – Co магнитов. Однако резкое различие температур Кюри (порядка 300°C у первых и 800°C у вторых) приводит к тому, что при реакторных испытаниях решающая роль принадлежит температуре образца за счёт его радиационного разогрева. При этом следует различать температуру, регистрируемую термопарой, и реальную температуру образца в его объёме, которая на 40 – 60 °C выше, что ещё более усугубляет изучаемый эффект. Именно этим обстоятельством и следует объяснять разительное различие в поведении параметра B_r у этих двух групп наиболее перспективных постоянных магнитов.

Литература

1. Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем : [пер. с англ.] / под ред. Б. Н. Быкова и С. Н. Соловьёва. – М. : Атомиздат, 1967. – 427 с.
2. Радиационная физика и химия полимеров / Ф. А. Махлис. – М. : Атомиздат, 1972. – 328 с.
3. Thermal stability and radiation resistance of SM-CO based permanent magnets / J. Liu, P. Vora, P. Dent et al. // Proceed. Space Nuclear Conf. – Boston, 2007.
4. The effect of neutron irradiation on Sm – Co-based magnets and Nd – Fe – В magnets / С. Н. Chen, J. Talnag, J. Liu et al. // Proceed. Space Nuclear Conf. – Boston, 2007. – P. 1 – 9.

Поступила в редакцию 24.06.2013

Андрей Павлович Тютнев, д-р физ.-мат. наук, ведущий научн. сотрудник, т. (495) 366-38-38.

Валерий Владимирович Сергеев, д-р техн. наук, советник, т. (495) 623-36-32, (495) 624-76-94.

Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38, e-mail: vniem@vniem.ru.

Геннадий Петрович Станолевич, д-р техн. наук, начальник лаборатории, т. (495) 366-32-11.