

Сандуляк Дарья Александровна

канд. техн. наук, инженер

Ткаченко Роман Юрьевич

аспирант

Щавинский Андрей Игоревич

аспирант

Логвинов Александр Николаевич

аспирант

Сандуляк Александр Васильевич

д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

г. Москва

DOI 10.21661/r-130397

ОБ УРОВНЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ «КОРОТКИХ» СПЛОШНЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАГНЕТИКОВ

Аннотация: на примере несплошных (гранулированных, в виде засыпок шаров ШХ15) и сплошных (стальных) ферромагнитных цилиндрических образцов в статье анализируются зависимости их размагничивающего фактора от относительного габарита образца (отношения его длины к диаметру). Подтверждена идентичность общего функционального вида таких зависимостей (для квазисплошных и сплошных образцов): экспоненциального – с таким аргументом как радикал относительного габарита. Отмечено, что множитель перед экспонентой является слабой степенной функцией магнитной проницаемости материала образца, обращающийся практически в константу для квазисплошного образца (характеризующегося сравнительно нешироким диапазоном возможного изменения проницаемости его «усредненного материала»).

Ключевые слова: сплошной ферромагнетик, гранулированный ферромагнетик, размагничивающий фактор, связь с относительным габаритом образца, уровень намагничивания.

Изучение магнитных свойств различных магнетиков – как сплошных, так и несплошных (в частности, гранулированных, зернистых, порошковых) – проводится, как правило, с образцами тех или иных форм и размеров, которые, как известно, сами влияют на эти свойства из-за действия так называемого размагничивающего фактора (коэффициента размагничивания) N . И лишь в редких случаях изучению подвергаются справедливо требуемые для подобных целей достаточно длинные (или модельные тороидные) образцы. В случае же использования «короткого» образца информация об N крайне важна.

По большинству имеющихся результатов прикладных и фундаментальных исследований, к сожалению, сложно судить, каким именно значением N обладает тот или иной исследуемый образец. А без такой информации получаемые данные о магнитных свойствах образца, например, данные проницаемости (и/или восприимчивости) остаются всего лишь частными, узко специфичными, отражающими свойства только образца данных размеров и формы. В отсутствие сведений об N судить о магнитных свойствах такого же образца, но других размеров и формы, не представляется возможным.

Стало быть, если речь идет, например, о магнитном сепараторе фильтрационного типа, в котором ключевым рабочим органом является ферромагнитная матрица (например, засыпка шаров), то разработчик и/или пользователь такого оборудования лишен данных о фактическом уровне (в сравнении с потенциальным уровнем) намагничивания фильтр-матрицы и, следовательно, о ее реальной работоспособности. При этом неясным остается и немаловажный вопрос о том, в какой мере используется по целевому назначению (в сравнении с потенциальным значением) намагничивающая сила электромагнитной системы аппарата.

Задача получения необходимой информации о размагничивающем факторе N магнетика обычно сводится к нахождению данных N для его цилиндрического образца в зависимости от относительного габарита L/D образца [1–5], т.е. отношения его длины L к диаметру D . Величину N для того или иного образца магнетика (как сплошного, так и, разумеется – квазисплошного) можно определить, используя известное классическое выражение:

$$N = \frac{1}{\chi_N} - \frac{1}{\chi} = \frac{1}{\mu_N - 1} - \frac{1}{\mu - 1}, \quad (1)$$

если располагать данными магнитной восприимчивости χ_N и/или проницаемости μ_N образца и магнитной восприимчивости χ и/или проницаемости μ его материала (для несплошного образца – его квазисплошного «материала»). При этом значения χ и μ – это потенциально возможные (предельные) значения $\chi_N \rightarrow \chi$ и $\mu_N \rightarrow \mu$ для такого же по составу, но тороидального или достаточно длинного образца ($L \gg D$), намагничиваемого в тороидальном или длинном соленоиде; лишь в данном случае $N \rightarrow 0$.

Значительный объем данных, касающихся определения N для различных (по L/D) цилиндрических образцов, состоящих из такой неоднородной среды как засыпка шарикоподшипниковых шаров, обобщен в [1–3]. Эти данные основывались на полевых зависимостях (в поле, создаваемом длинным соленоидом, напряженностью $H=25\text{--}165 \text{ кА/м}$) магнитного потока (измеряемого при помощи петли, охватывающей поперечное сечение образца и располагаемой посередине образца) и соответствующих полевых зависимостях средней индукции и проницаемости.

Анализируемые в [1–3] обобщенные значения N для образцов гранулированной среды оказались существенно зависимыми от L/D (рис. 1а). Попытка феноменологического описания этой эмпирической зависимости (рис. 1а) выявила факт ее неплохой линеаризации в полулогарифмических координатах, но при условии, если в качестве аргумента вместо относительного габарита образца L/D использовать его радикал, т.е. $\sqrt{L/D}$ (рис. 1б) [1–3]. К тому же, здесь следует учесть еще одно (неявное, но весьма примечательное) значение, а именно $N \rightarrow 1$ при $L/D \rightarrow 0$ (т.е. значение N , характерное для тонкой пластины). Тогда связь N и L/D практически представляется как экспоненциальная [1–3]:

$$N = \exp\left(-k_N \sqrt{\frac{L}{D}}\right), \quad (2)$$

при значении параметра k_N здесь, близком к $k_N \cong 1,5$.

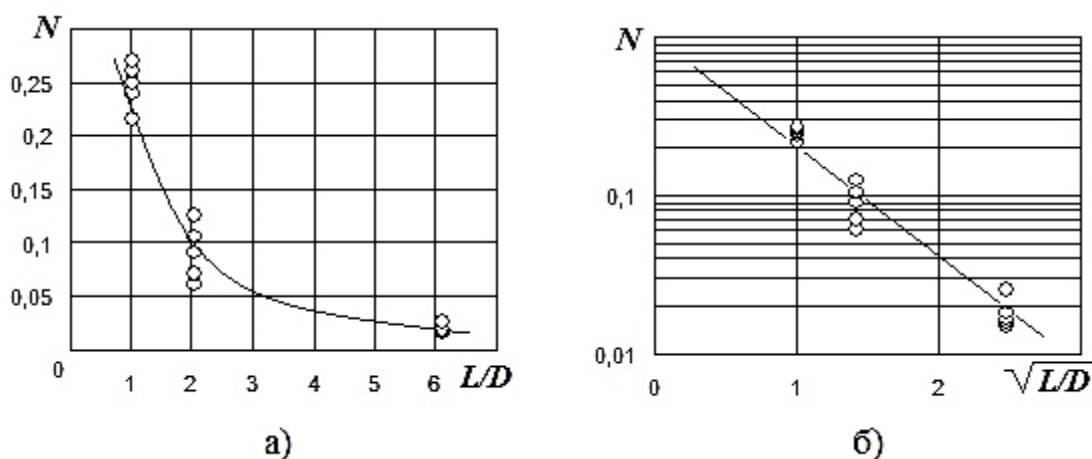


Рис. 1. Данные [1–3] размагничивающего фактора цилиндрических образцов гранулированной (полишаровой, сталь ШХ15) среды в зависимости от:
а) относительного габарита образца, б) радикала относительного габарита
(в полулогарифмических координатах)

Феноменологическую зависимость (2) в сочетании с фундаментальной физической связью (1), преобразованной к виду:

$$\frac{\mu_N}{\mu} = \Lambda = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\mu - 1}{(\mu - 1)N + 1} + 1 \right], \quad (3)$$

целесообразно использовать, в частности, для расчета фактических значений магнитной проницаемости μ_N той или иной «короткой» фильтр-матрицы (как квазисплошного образца) магнитного сепаратора и, разумеется, для сопоставления этих значений с потенциальными значениями ее проницаемости μ .

К примеру, если окажется, что фильтр-матрица близка к равновеликой ($L/D \approx 1$), то в соответствии с (2): $N = 0,22$. Тогда при характерных значениях $\mu = 5-10$ согласно (3): $\mu_N/\mu = 0,62-0,4$. Это означает, что создаваемый уровень магнитной проницаемости фильтр-матрицы (и средней индукции в ней) составляет лишь 62–40% от потенциального. Иначе говоря, намагничивающая система фильтр-сепаратора лишь на 62–40% используется по прямому назначению (намагничиванию матрицы для выполнения ею функции по захвату феррочастиц при решении технологических задач очистки фильтрующей среды от таких ча-

стиц). Остальная ее часть, т.е. 38–60%, является балластной, практически теряемой из-за действия размагничивающего фактора в такой (неудачно скомпонованной в аппарате) матрицы.

Разумеется, производя аналогичные вычисления по формулам (2) и (3), подобную характеристику можно дать гранулированным матрицам с иными значениями относительного габарита L/D .

Следует отметить и то принципиальное обстоятельство, что связь (2) оказалась применимой не только к гранулированным, а и к сплошным образцам. Об этом свидетельствуют специально проанализированные в [1] экспериментальные данные размагничивающего фактора N стальных цилиндрических образцов в зависимости от их относительного габарита L/D [4; 5] (рис. 2а). При этом, в отличие от гранулированных образцов, здесь имелась возможность привлечь результаты, полученные для образцов, обладающих взаимно сильно отличающимися значениями магнитной проницаемости их материала (рис. 3), например: $\mu = 5$, $\mu = 10$ и $\mu = 100$.

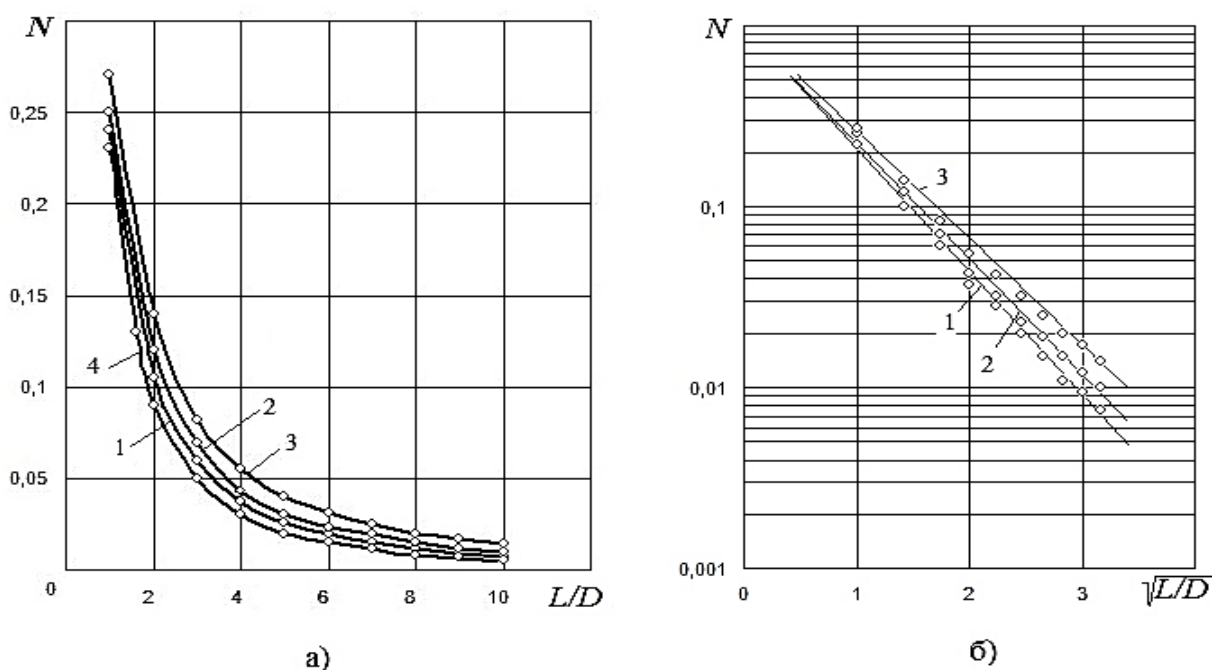


Рис. 2. Данные размагничивающего фактора стальных цилиндрических образцов в зависимости от: а) относительного габарита образца, б) радикала относительного габарита (в полулогарифмических координатах);

кривые 1, 2, 3 (соответствуют значениям $\mu=5$, $\mu=10$, $\mu=100$) – данные [4],
 кривая 4 – данные [5] (значение μ в [5], к сожалению, не оговорено)

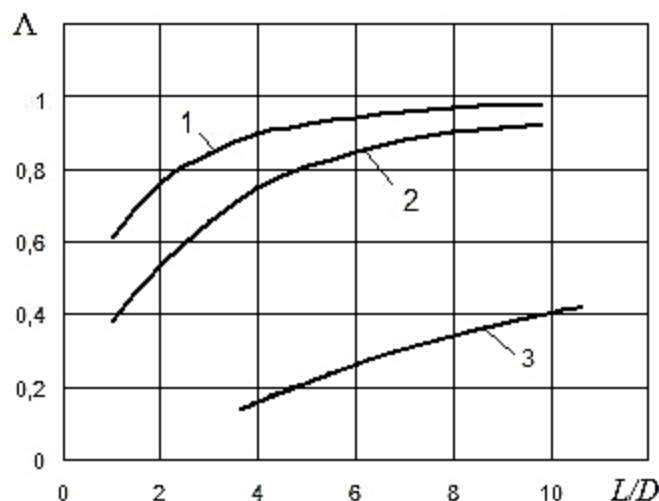


Рис. 3. Иллюстрация изменения значений относительного уровня магнитной проницаемости образцов в зависимости от их относительного габарита – по данным рис. 2 с использованием (3); 1 – $\mu = 5$, 2 – $\mu = 10$, 3 – $\mu = 100$

Найденные по (3) значения относительного уровня магнитной проницаемости стального образца $\Lambda = \mu_N/\mu$ при соответствующих значениях N (рис. 2а) проиллюстрированы на рис. 3 – в зависимости от L/D . Видно, что с уменьшением относительного габарита L/D образца, судя по снижению параметра Λ (рис. 3), его магнитные свойства (μ_N) все более уступают магнитным свойствам материала (μ) этого образца. И наоборот, с увеличением L/D магнитные свойства образца и его материала сближаются, причем с увеличением μ зона почти полной близости отодвигается в сторону все больших значений L/D . Так, для сравнительно невысоких значений $\mu = 5-10$ (рис. 3, кривые 1 и 2) магнитные свойства образца и его материала становятся практически достаточно близкими уже при $L/D \approx 10$. А для повышенных и высоких μ , например $\mu = 100$ (рис. 3, кривая 3), это достигается при гораздо более высоких значениях L/D . Поэтому оправданным является то известное правило, что при изучении магнитных свойств таких материалов в случае, когда используются цилиндрические (а не тороидальные)

образцы этих материалов, рекомендуется брать достаточно длинные образцы ($L/D \geq 50$) [4].

В [1] проведено тестирование данных рис.2а на соответствие выражению (2), т.е. на возможность его применения и к образцам сплошных магнетиков. Так, эти данные (рис.2а, кривые 1–3) представлялись в тех же, что и для гранулированных образцов, полулогарифмических координатах, где в качестве аргумента вместо относительного габарита L/D тоже использовался его радикал, т.е. $\sqrt{L/D}$ (рис. 2б) [1]. При этом принципиальной контрольной точкой выступал, как и ранее, обязательный ориентир: $N = 1$ при $L/D \rightarrow 0$.

В таких координатах данные N действительно хорошо линеаризуются (рис. 2б), свидетельствуя тем самым о той же (в определенной мере универсальной [1]) экспоненциальной связи N с указанным аргументом-радикалом $\sqrt{L/D}$. Вместе с тем, судя по имеющему место расслоению (для различных значений μ) зависимостей N от L/D и $\sqrt{L/D}$ (рис.2а и соответственно рис.2б), здесь, в отличие от константы $k_N \cong 1,5$ в (2), следует вести речь о параметре k_N (множителе перед экспонентой) как функциональном параметре [1]. В анализируемом диапазоне $\mu = 5-100$ связь k_N с μ оказалась близкой к слабой степенной [1]: $k_N = 1,7/\mu^{0,05}$, что, строго говоря, необходимо учитывать при пользовании выражениями (2) и (3) для образцов с различными (взаимно существенно отличающимися) значениями μ . Так, выражение (2) для сплошного образца в этом случае принимает более расширенный вид [1]:

$$N = \exp\left(-\frac{1,7}{\mu^{0,05}} \cdot \sqrt{\frac{L}{D}}\right), \quad (4)$$

по меньшей мере, справедливый для анализируемого (рис.2) диапазона значений магнитной проницаемости материала образца $\mu = 5-100$. Для сравнительно же узкого диапазона значений μ , например, характеризующих квазисплошной «материал» матрицы-магнетика ($\mu \approx 6-9$), функциональный коэффициент k_N , по сути, вырождается в константу $k_N \cong 1,5$.

Список литературы

1. Sandulyak A.A., Sandulyak D.A., Ershova V.A., et.al. Finding Out the Commonalities in Functional Expressions for Demagnetizing Factor of Quasi-solid and Solid Magnets // Proceedings of the «World Congress on Engineering 2015». London. – 2015. – July.
2. Sandulyak A.V., Sandulyak A.A., Shkatov P.N. Dependence of Granular Matrix Demagnetizing Factor on the Matrix Relative Size // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1083. – P. 32–36.
3. Сандуляк А.А. О свойствах «коротких» гранулированных магнетиков с неупорядоченными цепочками гранул: поле между гранулами / А.А. Сандуляк, В.А. Ершова, Д.В. Ершов, А.В. Сандуляк // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52. – Вып. 10. – С.1967–1974.
4. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. Издание третье. М.: Энергия, 1969. – 360 с.
5. Chen D.-X, Brug J.A., Goldfarb R.B. Demagnetizing factors for cylinders // IEEE Transactions on Magnetics. – 1991. – Vol. 27. – №4. – P. 3601–3619.