

3. Зорев Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания. М.:Машгиз, 1956, 365с.
4. Грановский Г.И., Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985, 304с.
5. Режущий инструмент: Учебник для вузов/ Под редакцией С.В. Кирсанова.- 3-е издМ.: Машиностроение, 2007.-528 с.: ил.
6. Костюков Я.Х. Динамика фасонного фрезерования. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва 1981,140с.

### **Размагничивающий фактор гранулированного магнетика (фильтрующей матрицы) как жгута каналов намагничивания**

д.т.н. проф.Сандуляк А.В., к.т.н. доц. Сандуляк А.А., к.т.н. Ершова В.А.  
МГТУ «МАМИ»  
(495) 223-05-23 доб. 1313

*Аннотация.* Излагаются и анализируются данные размагничивающего фактора различных (по относительной длине) образцов гранулированной среды (засыпки шаров) и сердцевин эффективного канала намагничивания в цепочке шаров. Приводятся соответствующие экспериментальные и описывающие их феноменологические зависимости размагничивающего фактора.

*Ключевые слова:* гранулированная среда, цепочка шаров, размагничивающий фактор

1. При исследовании магнитных свойств композитных сред (а эти исследования проводятся с их образцами конечных размеров) крайне необходимым становится и определение значений такого «теневое», но исключительно важного количественного параметра, как размагничивающий фактор  $N$  [1-3] самих образцов, иначе получаемые данные проницаемости (и/или восприимчивости) останутся всего лишь частными, узко специфическими. Как это ни покажется парадоксальным, но по большинству имеющихся результатов экспериментальных исследований композитных магнетиков зачастую сложно судить, каким именно значением  $N$  обладает тот или иной исследуемый образец, какой из параметров проницаемости фигурирует в тех или иных выкладках: квазисплошной среды  $\mu$  или квазисплошного образца (конечных размеров)  $\mu_L$  этой среды. Более того, если прямые или косвенные данные все же указывают на то, что речь идет, например, о  $\mu_L$ , то информация о  $\mu$  как более общем параметре продолжает оставаться недоступной (даже при известных данных  $\gamma$ ).

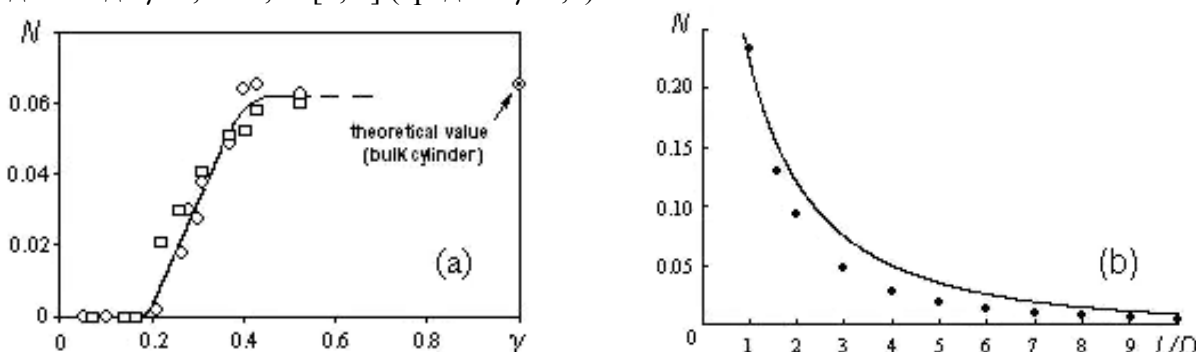
В такой ситуации (или подобной ситуации, когда по известному значению  $\mu$  требуется определить  $\mu_L$ ) данные об  $N$  действительно важны, особенно – соответствующие функциональные зависимости, например, с учетом геометрии образца (упоминания о таких зависимостях применительно к композитным магнетикам авторам не известны). Как и важны данные (кстати, тоже часто отсутствующие) о конкретной геометрии объекта исследования, в частности, об относительном габарите образца: для цилиндрического – отношении его длины  $L$  к диаметру  $D$ .

При наличии упомянутых зависимостей можно решать эти и другие прямые и обратные задачи, в том числе, не прибегая к специальным (дополнительным) исследованиям, находить любое частное (для иного образца) значение  $\mu_L$  (отличное от уже установленного в том или ином конкретном опыте).

2. К композитным магнетикам относится широкий класс «плотно упакованных» гранулированных (зернистых) сред-магнетиков, являющихся, в частности, рабочим органом магнитного фильтра. Их объемная концентрация  $\gamma$  находится именно в одном из характерных (рисунок 1а) [2] интервалов  $\gamma$  – в закритической области, т.е. за перколяционным переходом, в области хорошей металлической проводимости [1, 2].

Варианты искусственного структурирования гранулированных (модельных полишаро-

вых) сред указывают на значения  $\gamma$  от  $\gamma \cong 0,52$  для классической кубической упаковки до  $\gamma=0,74$  для более сложной упаковки [4]. Интервал же  $\gamma$  для реально и широко используемых засыпок гранул-зерен (шаров) еще более сужается, сохраняя лишь весьма слабую зависимость от относительного габарита среды-засыпки; фактически интервал  $\gamma$  для таких сред вырождается до  $\gamma=0,55-0,64$  [1, 4] (среднее  $\gamma \cong 0,6$ ).



**Рисунок 1 - Размагничивающий фактор  $N$  цилиндрического образца:**

**a)** гранулированной среды – в зависимости от концентрации ферромагнитного материала  $\gamma$  (данные [2]). Область автомодельности  $N$  – при «повышенной и высокой» концентрации:  $\gamma \geq 0,4 \dots 0,45$  вплоть до  $\gamma=1$  (здесь значение  $N$  при  $\gamma=1$  – теоретическое [2]); **b)** зависимость от относительного габарита образца; точки – данные [3] для сплошного образца, линия – расчет по (3) для гранулированного образца

И здесь, применительно к образцам гранулированных сред-засыпок с подобными значениями  $\gamma$ , следует особо отметить одно из принципиальных обстоятельств, изначально упрощающих большой объем экспериментов по изучению их размагничивающего фактора  $N$  и упрощающих получение соответствующих результатов. Так, характерные для них значения  $\gamma$  находятся в автомодельной области ( $\gamma > 0,4 \dots 0,45$ ) (рисунок 1a) [2] концентрационной зависимости размагничивающего фактора  $N$  образца гранулированной среды, т.е. в области стабилизированных значений  $N$ . Вместе с тем, несмотря на это важное обстоятельство, требуемый объем необходимых исследований, касающихся получения необходимой информации о  $N$ , продолжает оставаться значительным, поскольку  $N$  функционально зависит (как и для сплошных образцов [3] – см. рисунок 1b) от относительного габарита «разноразмерного» образца; для образца цилиндрической формы – от  $L/D$ .

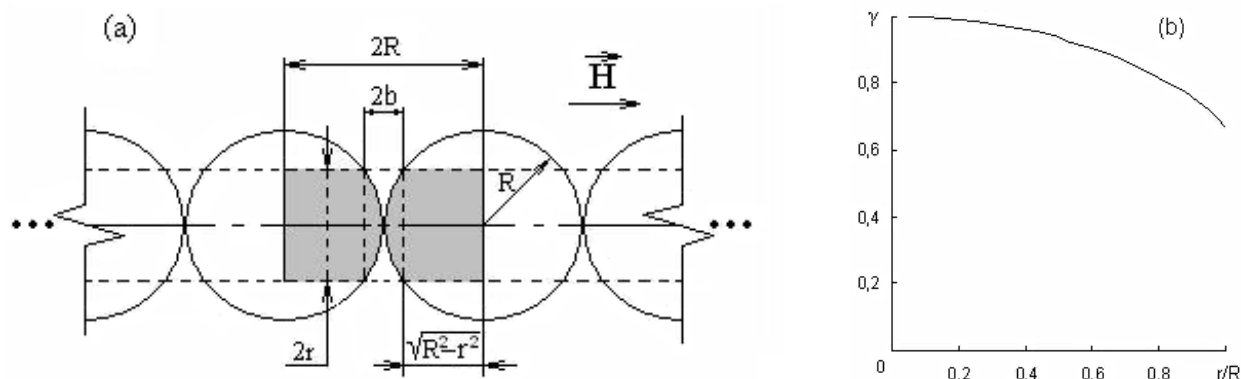
**3.** Особенностью «плотно упакованных» гранулированных сред (с контактирующими между собой гранулами-зернами) является то, что в них обнаруживается механизм поканального (селективного) намагничивания [1, 5-7]; ответственными за намагничивание такой среды становятся цепочки гранул. Способствующие формированию в таких средах «элементарных» эффективных каналов намагничивания, они всегда проявляют себя (среди множества взаимно контактирующих гранул-звеньев разветвленной скелетной структуры) сообразно направлению намагничивания. Стало быть, «плотно упакованная» намагниченная гранулированная среда как представляющая собой своеобразный жгут эффективных магнетиков-каналов, пронизывающих эту среду [1, 5-7], может быть проанализирована и с точки зрения количественного проявления размагничивающего фактора ее элементов: магнетиков-каналов.

Но при этом следует иметь в виду следующее: каждый из таких магнетиков-каналов, хотя и может характеризоваться усредненными значениями, например, проницаемости [5], тем не менее, имеет сильно выраженный колоколообразный профиль проницаемости [6, 7].

Значит, с позиций роли размагничивающего фактора сам магнетик-канал может и должен быть оценен более детально: с «выделением» в нем (например, потокоизмерительной петлей) квазисплошной сердцевинки того или иного радиуса  $r$  (рисунок 2a).

Такой концептуальный подход тем более интересен, если учесть, что различным серд-

цевинам «автоматически» соответствуют и различные значения объемной концентрации  $\gamma$  металла в них (рисунок 2а); значения  $\gamma$  для сердцевин «заполняют разрыв» между значениями  $\gamma$  для гранулированных и сплошных магнетиков. А это возможность для последующего сравнительного, более информативного, анализа получаемых данных с соответствующими данными и для гранулированного магнетика, и для сплошного магнетика.



**Рисунок 2 - Объемная концентрация  $\gamma$  металла в той или иной сердцевине радиуса  $r$  (выделено пунктиром) эффективного магнетика-канала в цепочке шаров, а) расчетная схема, б) зависимость**

Так, значение  $\gamma$  для сердцевины изменяется от  $\gamma=0.66$  (для «полного» магнетика-канала: цепочки полнообъемных шаров), соизмеримого со значением  $\gamma \cong 0.6$  для гранулированного магнетика, до значения  $\gamma \rightarrow 1$  (для сердцевин в окрестности межцентровой линии шаров), весьма близкого к значению  $\gamma=1$  для сплошного магнетика.

В этом легко убедиться, геометрически определяя  $\gamma$  для сердцевин магнетика-канала как долю объема металла (на рисунке 2а затушено) в объеме характерного для сердцевин «звена» длиной  $2R$  и сечением  $\pi r^2$ . С учетом того, что объем металла в «звене» – это суммарный удвоенный объем цилиндра длиной  $(R^2 - \gamma^2)^{0.5}$  и удвоенный объем шарового сегмента  $\pi b(b^2 + 3\gamma^2)$  высотой  $b = R - (R^2 - \gamma^2)^{0.5}$  (рисунок 2а), расчетная формула для определения концентрации металла  $\gamma$  в сердцевине принимает такой вид:

$$\gamma = 2 \left\{ 1 - \left[ 1 - (r/R)^2 \right]^{0.5} \right\} / 3 + 2 \left[ 1 - (r/R)^2 \right]^{0.5} / 3, \quad (1)$$

Иллюстрация (1) на рисунке 2б действительно свидетельствует, что параметр  $\gamma$  для сердцевин изменяется в «вакантном» (между значениями  $\gamma$  для гранулированной среды-засыпки и сплошной среды) диапазоне. Потенциальная ширина этого диапазона (рисунок 2): от значения  $\gamma=0.66$  ( $r/R=1$ , здесь сердцевинной является практически сам магнетик-канал, проводником которого служит цепочка полнообъемных шаров) до значения  $\gamma \rightarrow 1$  ( $r/R \rightarrow 0$ , здесь утоняющаяся сердцевина магнетика-канала – это «тело» в окрестности межцентровой линии шаров).

**4.** Хотя понятие размагничивающего фактора того или иного магнетика является общепризнанным, тем не менее, встречаются случаи, когда это понятие, к сожалению, трактуется субъективно [8]: как простая разница значений индукции в сравниваемых образцах гранулированной среды различной длины (толщины).

Такую упрощенную характеристику нельзя признать обоснованной: давая определенное наглядное представление (пожалуй, лишь о самом проявлении размагничивающего фактора), тем не менее, она не позволяет судить о фактических значениях этого фактора. Так, эти данные, получаемые для нескольких однотипных (но имеющих различный относительный габарит) образцов, не поддаются соответствующему перерасчету к фактическим значениям истинного размагничивающего фактора, а тем более – к значениям проницаемости  $\mu$  квазисплошного «материала» образца.

В соответствии с известным классическим определением, а именно:

$$N = 1/(\mu_L - 1) - 1/(\mu - 1), \quad (2)$$

размагничивающий фактор  $N$  любого магнетика-образца является вполне конкретным физическим параметром, устанавливающим однозначную связь между магнитной проницаемостью  $\mu_L$  (восприимчивостью  $\mu_L - 1$ ) образца определенной формы (например, образца цилиндрической формы с индивидуальным значением относительного габарита  $L/D$ ) и магнитной проницаемостью  $\mu$  материала образца.

При этом значения  $\mu$ , т.е. потенциально возможные (предельные) значения  $\mu_L \rightarrow \mu$ , получают, как известно, для такого же по составу, но тороидального или достаточно длинного образца:  $L \gg D$  (намагничиваемого в тороидальной или длинной катушке). Лишь в данном случае  $N=0$  (и  $\mu_L = \mu$ ), в других случаях  $N > 0$  (а  $\mu_L < \mu$ ) вплоть до  $N=1$  – для тонкого образца ( $L/D \rightarrow 0$ ).

В этой связи стоит заметить, что параметр  $N$ , изменяясь от  $N=0$  до  $N=1$ , способен кардинально изменить и сами значения  $\mu_L$ : соответственно от  $\mu_L = \mu$  до таких  $\mu_L$  (при  $N=1$ ), которые при любых, даже гиперзначениях  $\mu$ , ограничиваются величиной  $\mu_L < 2$ .

Такой, на первый взгляд, неожиданный результат непосредственно вытекает из базового определения (2), анализ которого показывает, что завышенный размагничивающий фактор  $N$  образца может привести к существенному «гашению» (недоиспользованию) потенциальных возможностей самого материала образца и даже свести к минимуму (при  $N=1$ :  $\mu_L = 2 - 1/\mu < 2$ ) магнитные свойства этого материала. А это еще раз подчеркивает роль  $N$  как значимого параметра, в отсутствие информации о котором невозможно дать объективную развернутую характеристику параметрам того или иного магнетика.

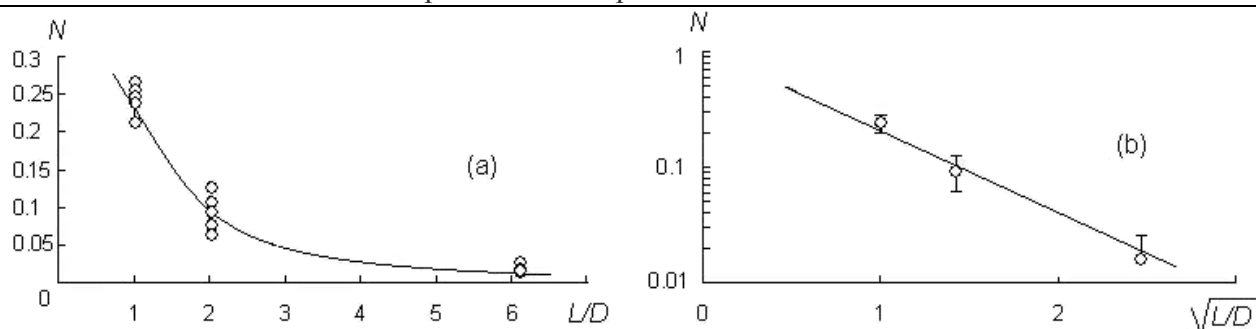
Разумеется, сказанное в равной степени относится и к таким специфичным магнетикам, как образец именно гранулированной среды или сердцевина эффективного магнетика-канала (элемента этой среды). В принципе нет никаких препятствий применить к ним общепринятое определение (2) для  $N$ , естественным, уподобляя такую среду или сердцевину магнетика-канала квазисплошному магнетик. При этом, как и для сплошного образца, здесь можно придерживаться той же символики, а именно:  $\mu_L$  – проницаемость самого образца (конечных размеров, образно говоря, – «короткого»), а  $\mu$  – проницаемость его квазисплошного «материала», которая, подобно случаю со сплошными образцами, должна находиться как предельное значение параметра  $\mu_L$  ( $\mu_L \rightarrow \mu$  при  $L \gg D$ ).

5. В опытах использовались цилиндрические образцы гранулированной среды: в виде засыпки шарикоподшипниковых шаров ШХ-15 диаметром  $d_b = 6$  mm в корпусе диаметром  $D = 59$  mm и высотой  $L$ , изменяемой от опыта к опыту. Объемная концентрация (плотность упаковки) шаров составляла  $\gamma \cong 0.6$ .

Для нахождения значений  $N$ , вычисляемых по определению (2) и представляемых в виде зависимости  $N$  от  $L/D$  (рисунок 3), использовали семейство (получаемое при различных значениях  $L/D$  – от  $L/D=1$  до  $L/D=22$ ) полевых характеристик значений средней проницаемости  $\mu_L$  образцов этой среды. Диапазон напряженности намагничивающего поля (в длинном соленоиде, где размещались образцы гранулированной среды) составлял  $H = 25-165$  kA/m.

Что же касается одновременно используемых в (2) для определения  $N$  значений проницаемости  $\mu$  «материала» этой среды, то их находили как потенциальные (предельные) значения проницаемости  $\mu_L$ , а именно  $\mu_L \rightarrow \mu$  – для достаточно длинного ( $L \gg D$ ) образца. И, как было установлено из упомянутых предельных полевых характеристик, значения  $\mu$  достигаются уже при  $L/D \geq 8-10$ .

Полученные таким образом данные размагничивающего фактора  $N$  (рисунок 3а) в принятом диапазоне  $H$  оказались в существенной мере зависимыми от относительного габарита образца гранулированной среды  $L/D$ . В то же время незначительный разброс данных  $N$ , полученных при различных  $H$  (рисунок 3а), позволяет заключить, что в принятом диапазоне эти данные почти не зависят от  $H$  (и от магнитной проницаемости металла шаров). Значит, здесь при анализе вполне можно ограничиться усредненными (по  $H$ ) значениями  $N$ .



**Рисунок 3- Размагничивающий фактор цилиндрического образца гранулированной (полишаровой) среды – в зависимости от его относительного габарита (a) и радикала этого габарита (b)**

Установленная зависимость  $N$  от  $L/D$  (рисунок 3a), будучи представленной в полулогарифмических координатах (рисунок 3b) с таким аргументом, как радикал относительного габарита образца, линеаризуется, свидетельствуя о ее экспоненциальном характере:

$$N = \exp(-1.5\sqrt{L/D}), \quad (3)$$

причем на ход этой зависимости, как это видно из рисунка 3b, указывает еще одна, неявная контрольная точка, а именно  $N \rightarrow 1$  при  $L/D \rightarrow 0$ , т.е. как для тонкой пластины.

Характерно, что полученная для гранулированного цилиндрического образца (напомним, с объемной концентрацией металла  $\gamma \cong 0.6$ ) зависимость (3) согласуется (рисунок 1b) с аналогичными данными, полученными для сплошных цилиндрических образцов [3] (образцов с присущим для них значением  $\gamma=1$ ).

И такая общность закономерностей зависимости размагничивающего фактора  $N$  образца от его относительного габарита  $L/D$ , по-видимому, является характерной для всех образцов магнетиков с «повышенными и высокими» значениями концентрации  $\gamma$  ферромагнитного материала. Надо полагать, диапазон этих значений  $\gamma$  начинается с  $\gamma > 0,4 \dots 0,45$  (рисунок 1) [2], т.е. когда начинается обширная область автомодельности концентрационной зависимости  $N$ . Судя же по теоретически оцененному в [2], все еще «автомодельному», значению  $N$  даже при  $\gamma=1$  (рисунок 1a), а также по согласию (3) с данными [3] (рисунок 1b) для реального сплошного образца, диапазон обсуждаемых значений  $\gamma$  продолжается вплоть до  $\gamma=1$ .

**6.** Сделанный выше вывод об общности функционального (зависящего от относительного габарита образца) вида размагничивающего фактора  $N$  для образцов магнетиков с «повышенной и высокой» концентрацией  $\gamma$  ферромагнитного материала усиливается и результатами исследований весьма «концентрированных» (в сравнении с гранулированными средами-засыпками, для которых  $\gamma \cong 0.6$ ) сердцевин эффективного магнетика-канала (рисунок 2,  $0.66 < \gamma < 1$ ) в цепочке шаров.

В опытах использовались цепочки шарикоподшипниковых шаров ШХ-15, намагничиваемых, подобно вышеизложенным опытам, в длинном соленоиде. Диапазон напряженности намагничивающего поля, создаваемого этим соленоидом, составлял здесь  $H=18-175$  kA/m.

Та или иная сердцевина магнетика-канала в цепочке шаров «выделялась» соответствующей потокоизмерительной петлей; система концентричных петель [7] различного радиуса  $r$  располагалась посреди цепочки (состоящей из четного числа  $n = L/d_b$  шаров, где  $d_b = 2R$  – диаметр шаров) между смежными шарами.

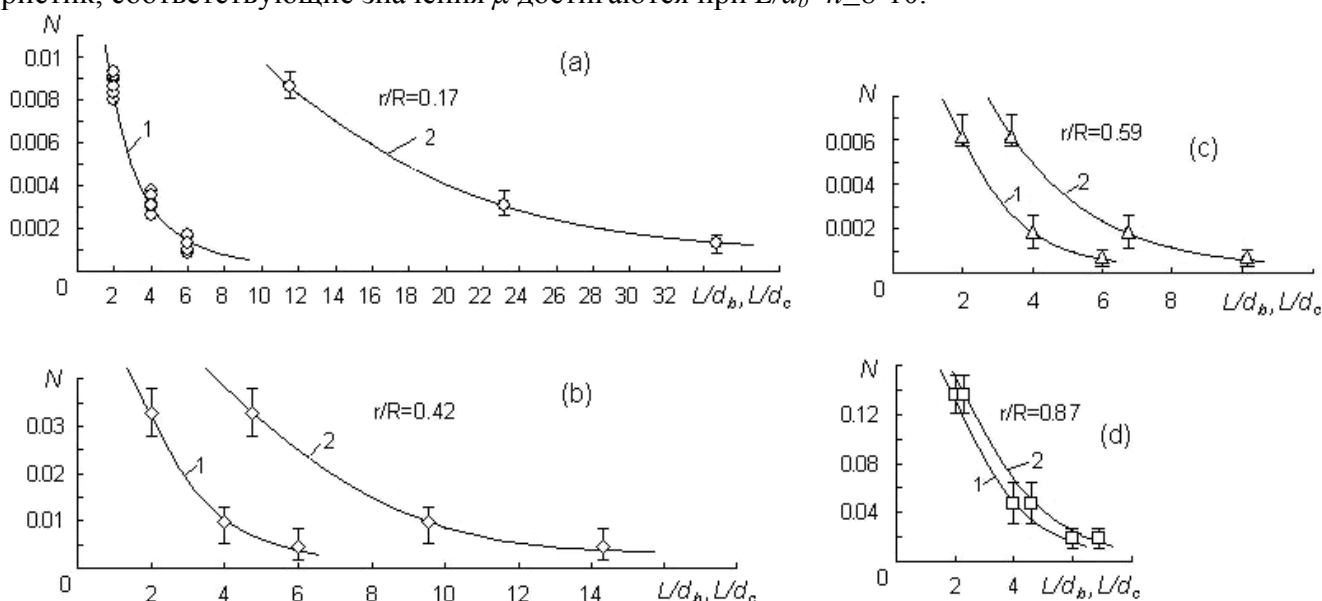
Для обеспечения возможности исследования сердцевин сравнительно малого радиуса – с как можно более высокими значениями  $\gamma$  (и возможности соответствующего размещения петель) – в этих сериях опытов использовались шары повышенного радиуса  $R=16.65$  mm.

Значения  $N$ , вычисляемые по определению (2), представлялись двояко. Первое: в зависимости от формального параметра (рисунок 4, кривые 1) – относительной длины цепочки шаров  $L/d_b$  ( $L = nd_b$  – общая длина цепочки шаров или, что то же – длина сердцевин магне-

тика-канала,  $d_b$  – диаметр шаров). Второе: в зависимости от фактического параметра (рисунок 4, кривые 2) – относительной длины самой исследуемой сердцевинки  $L/d_c$  магнетика-канала ( $d_c = 2r$  – диаметр той или иной сердцевинки).

Для определения  $N$  использовали семейства (получаемые при различных значениях  $L/d_b$ ,  $r/R$ , а следовательно, и  $L/d_c$ ) полевых характеристик средней проницаемости  $\mu_L$  различных сердцевин магнетиков-каналов в цепочке шаров. Значения  $L/d_b$  варьировали от  $L/d_b=2$  до  $L/d_b=16$ , а значения  $r/R$  – от  $r/R=0.17$  до  $r/R=0.87$ , и в таком диапазоне  $r/R$  в соответствии с (1) и рисунком 2 значения  $\gamma$  «автоматически» изменялись от  $\gamma=0.993$  до  $\gamma=0.78$ .

Что же касается одновременно используемых для определения  $N$  – в соответствии с (2) – значений проницаемости  $\mu$  «материала» каждой из сердцевин магнетика-канала, то, подобно вышеописанному, их находили как потенциальные (предельные) значения проницаемости  $\mu_L$ , а именно  $\mu_L \rightarrow \mu$ , для достаточно длинной сердцевинки ( $L \gg d_c$ ) и соответственно достаточно длинной ( $L \gg d_b$ ) цепочки шаров. Как было установлено из предельных полевых характеристик, соответствующие значения  $\mu$  достигаются при  $L/d_b = n \geq 8-10$ .

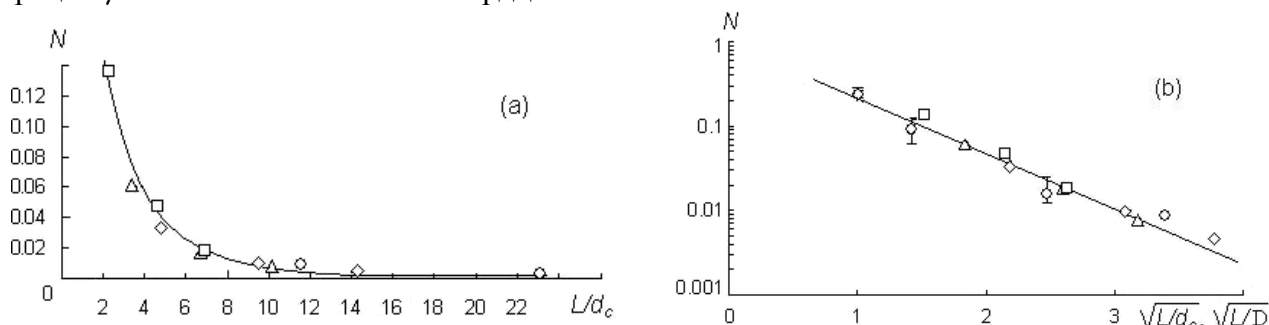


**Рисунок 4 - Размагничивающий фактор сердцевинки магнетика-канала в цепочке шаров – в зависимости от относительного габарита цепочки шаров  $L/d_b$  (формального параметра, кривые 1) и относительного габарита сердцевинки  $L/d_c$  магнетика-канала (фактического параметра, кривые 2). Локальные значения  $N$ , полученные для различных значений  $H$ , показаны здесь лишь на одном графике (при  $r/R=0,17$ ), на остальных изображены интервалы изменений  $N$**

Из полученных данных, представленных на рисунке 5, видно, что значения  $N$  снижаются и с увеличением относительного габарита цепочки  $L/d_b$ , и с увеличением относительного габарита собственно сердцевинки магнетика-канала  $L/d_c$ . При этом в принятом рабочем диапазоне напряженности намагничивающего поля  $H$  разброс локальных значений  $N$  оказался сравнительно небольшим (рисунок 4), что, как и ранее, свидетельствует о слабой зависимости здесь  $N$  от  $H$  и вполне позволяет ограничиваться анализом с использованием усредненных (по  $H$ ) значений  $N$ .

Из полученных «двух видов» данных  $N$  (рисунок 4, кривые 1 и 2) особый интерес представляет анализ данных  $N$  именно в зависимости от относительного габарита сердцевинки-магнетика  $L/d_c$  (рисунок 4, кривые 2). Если эти данные (для самых разных, в том числе дублирующих друг друга значениях параметра  $L/d_c$ , сердцевин-магнетиков) свести вместе (рисунок 5а), то последует замечательный (и вполне ожидаемый) факт. В таких координатах все полученные значения  $N$  достаточно хорошо обобщаются единой зависимостью (рисунок 5а),

несмотря, повторим, на различные относительные значения радиуса («толщины») сердцевин-магнетика, а значит, несмотря на различные индивидуальные значения объемной концентрации  $\gamma$  металла в той или иной сердцевине магнетика-канала.



**Рисунок 5 - Обобщенные (по данным рисунка 4) данные размагничивающего фактора сердцевин магнетика-канала в цепочке шаров – в зависимости от относительного габарита сердцевин (a) и радикала этого габарита (b);  $\circ$  –  $r/R=0,17$ ,  $\diamond$  –  $0,42$ ,  $\Delta$  –  $0,59$ ,  $\square$  –  $0,87$ . Здесь же – данные из рисунка 3b для гранулированного образца**

К тому же, как это следует из этого же массива данных  $N$  (рисунок 4a), дополнительно представленных в полулогарифмических координатах (рисунок 4b), они имеют аналогичную (изложенным выше данным для образцов гранулированной среды) экспоненциальную зависимость, здесь – от радикала относительного габарита  $L/d_c$  сердцевин магнетика-канала:

$$N = \exp(-1.5\sqrt{L/d_c}), \quad (4)$$

в том числе с учетом неявной контрольной точки:  $N \rightarrow 1$  при  $L/d_c \rightarrow 0$  (подобное обстоятельство оговорено ранее).

Таким образом, выражения (3) и (4), полученные для образца гранулированной среды ( $\gamma \cong 0.6$ ), состоящей из жгута магнетиков-каналов, и сердцевин магнетика-канала (в проведенных опытах  $0.78 \leq \gamma \leq 0.993$ ), как и соответствующие данные  $N$ , сведенные вместе на рисунке 5b, согласуются между собой.

И такое согласие действительно подтверждает оговоренную выше (в том числе с учетом данных [2, 3]) общность характера размагничивающего фактора для магнетиков с «повышенной и высокой» концентрацией  $\gamma$  ферромагнитного материала: начиная от 0.4...0.45 и вплоть до 1.

### Выводы

Изучен размагничивающий фактор «коротких» цилиндрических магнетиков-образцов гранулированной среды (засыпки шаров с объемной концентрацией металла  $\gamma \cong 0.6$ ) и сердцевин (различного радиуса со значениями  $0.78 \leq \gamma \leq 0.99$ ) магнетика-канала в цепочке шаров. На основании экспериментальных данных получены соответствующие, согласующиеся между собой феноменологические экспоненциальные связи этого фактора и радикала относительного габарита таких квазисплошных магнетиков.

### Литература

1. Сандуляк А.А., Ершова В.А., Ершов Д.В., и др. ФТТ. 2010. Т.52. Вып.10. С.1967-1974.
2. Jean-Luc Mattei, Marcel Le Floc'h. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 257 (2003). P.335–345.
3. Du-Xing Chen, James A. Brug, Ronald B. Goldfarb. IEEE Transactions on Magnetics. Vol.27. No.4. 1991. P.3601-3619.
4. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершова В.А. ТОХТ. 2008. Т.42. №2. С.231-235.
5. Сандуляк А.В. ЖТФ. 1982. Т.52. Вып. 11. С.2267-2269.
6. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершова В.А. ДАН. 2007. Т.413. № 4. С. 469-471.
7. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Ершова В.А. ЖТФ. 2009. Т.79. Вып.5. С.140-143.
8. Ростами Х.Р. ЖЭТФ. 2005. Т.128. Вып.4 (10). С.760-767.