

В. Ю. Цивилицин, член-корреспондент НАН Украины
Ю. В. Мильман, В. А. Гончарук, И. Б. Бондар

Применение спеченных высокоэнергетических постоянных магнитов при разработке “магнитных пружин”

Розглянуто магнітну систему, в якій високоенергетичний порошковий постійний магніт втягується в магнітопровід — “магнітна пружина”. Розроблено і виконано розрахунок максимальної сили втягування для порошкових високоенергетичних постійних магнітів з круглим і прямокутним перетинами. Сконструйовано, виготовлено та досліджено магнітну пружину з діаметром магнітопроводу 50 мм і постійним магнітом діаметром 30 мм, довжиною 60 мм. Сила втягування такої пружини — 17 кг. Спостерігається відповідність теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень.

1. В середине восьмидесятых годов прошлого века был разработан новый класс постоянных магнитов на основе системы Nd-Fe-B с рекордным энергетическим произведением $(BH)_{\text{MAX}}$ — до 400 кДж/м³. Эти магниты получают методом порошковой металлургии. Процесс получения состоит из следующих этапов:

- 1) выплавка прецизионного литого сплава;
- 2) измельчение литого сплава в защитной среде до частиц диаметром менее 10 мкм;
- 3) прессование полученной суспензии в магнитном поле (для создания магнитной анизотропии постоянного магнита);
- 4) спекание подготовленных прессовок в вакуумной печи;
- 5) специальная термообработка для увеличения магнитных свойств (коэрцитивной силы и энергетического произведения).

Структура Nd-Fe-B магнитов характеризуется наличием ферромагнитной фазы диаметром менее 10 мкм (чтобы большинство частиц порошка были близки к размеру домена магнитной фазы Nd₂Fe₁₄B) и немагнитных межзеренных прослоек, обеспечивающих высокую коэрцитивную силу. Полученный постоянный магнит обладает высокими магнитными свойствами благодаря наличию созданной магнитной анизотропии. Обзор свойств порошковых высокоэнергетических магнитов дан в [1].

В связи с появлением высокоэнергетических порошковых магнитов на основе редкоземельных металлов актуальным стал вопрос о создании магнитно-механических устройств, поскольку использование этих магнитов позволяет получать значительные усилия. В таких устройствах широкое применение может найти система, в которой постоянный магнит втягивается в магнітопровід. Такие конструкции по принципу действия могут быть названы “магнитными пружинами”. Авторам не удалось обнаружить в литературе решения типичных задач по расчету усилия втягивания (вытягивания) постоянного магнита в магнітопровід. Настоящая работа посвящена расчету максимального усилия втягивания постоянного магнита в виде цилиндра с диаметральной намагниченностью в кольцевой магнітопровід и экспериментальному изучению усилия втягивания. Задача решается с использованием энергетического подхода и метода виртуальных перемещений. Полученные результаты экспериментально проверены на магнитах с круглым и прямоугольным сечениями.

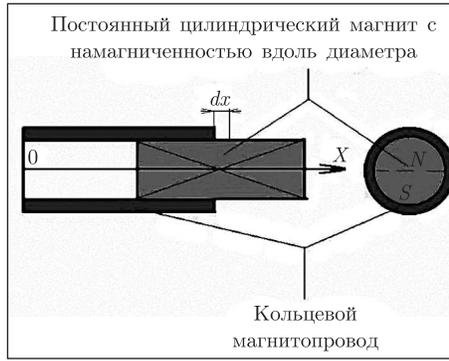


Рис. 1. Принципиальная схема работы магнитной пружины с цилиндрическим магнитом

2. Расчет максимального усилия втягивания “магнитной пружины”. Рассмотрим постоянный магнит в виде цилиндра и кольцевой магнитопровод, изготовленный из магнитомягкого материала (рис. 1). Толщина стенки магнитопровода должна быть достаточной, чтобы проводить весь магнитный поток от одного полюса постоянного магнита к другому: на практике для магнитопровода из стали 3 с внутренним диаметром 30 мм внешний диаметр составляет около 40 мм. Постоянный магнит в виде цилиндра входит в магнитопровод по скользящей посадке.

При втягивании магнита на расстояние dx совершается работа:

$$dA = F dx, \quad (1)$$

где F — усилие втягивания.

С другой стороны, внутри постоянного магнита до введения его в магнитопровод существовало размагничивающее поле B [2]

$$B = -NB_r, \quad (2)$$

обусловленное существованием полюсов магнита. В данном выражении N — размагничивающий фактор; B_r — остаточная индукция. После введения магнита в магнитопровод это поле перестает существовать (полюса замыкаются и размагничивающий фактор становится равным нулю), и вся его энергия уходит на выполнение работы по перемещению постоянного магнита. Плотность энергии магнитного поля w (в соответствии с [3]):

$$w = B^2/2\mu_0 = N^2 B_r^2/2\mu_0, \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — универсальная магнитная постоянная.

При перемещении магнита на расстояние dx происходит изменение энергии W магнитного поля:

$$dW = w dV, \quad (4)$$

где w — плотность энергии магнитного поля; V — объем, в котором произошло изменение поля.

В нашем случае

$$dV = S dx, \quad (5)$$

где S — площадь сечения магнита перпендикулярно оси цилиндра.

Подставляя (3) и (5) в (4), получаем

$$dW = N^2(B_r^2/2\mu_0)Sdx. \quad (6)$$

Приравнивая (1) и (6) $dA = dW$ и сокращая на dx , получаем простое выражение для усилия втягивания (вытягивания) F постоянного магнита в магнитопровод:

$$F = N^2(B_r^2/2\mu_0)S, \quad (7)$$

где N — размагничивающий фактор, зависящий только от геометрической формы магнита; B_r — остаточная индукция материала, из которого изготовлен постоянный магнит.

На основании этой формулы можно рассчитать усилие втягивания цилиндрического магнита с диаметральной намагниченностью в кольцевой магнитопровод.

Пусть диаметр магнита составляет 30 мм и $S = 656,6 \text{ мм}^2$, остаточная индукция материала $B_r = 1,25 \text{ Тл}$ (характерная величина для спеченных постоянных магнитов на основе системы NdFeB, например, сплав N38SH в международной классификации). Подставив численные значения в формулу (7), получаем:

$$F = 408N^2, \text{ Н.} \quad (8)$$

Размагничивающий фактор для простых геометрических форм может изменяться в пределах от 0,5 до единицы; соответственно, из (8) следует, что предельное усилие втягивания в данном случае может достигать 400Н. Для цилиндра N можно определить экспериментально, измеряя усилие втягивания или определяя индукцию магнитного поля на поверхности в центре полюса магнита. Проведенные нами измерения индукции на поверхности полюса показывают величины порядка 400 мТл. Отсюда следует, что размагничивающий фактор цилиндра приблизительно равен

$$N = 1 - B_{\text{пов}}/B_r = 0,616. \quad (9)$$

Соответствующее усилие втягивания цилиндра с диаметром 30 мм и небольшим центральным отверстием диаметром 8 мм должно составить 15,8 кг в соответствии с (8) (площадь считали для магнита с отверстием), т. е.

$$F_{\text{втяг}} = 15,8 \text{ кгс.} \quad (10)$$

Усилие втягивания 100 кг может быть создано в системе с диаметром магнита 75 мм и диаметром магнитопровода 120 мм.

3. Экспериментальное исследование усилия втягивания “магнитных пружин”.

Цилиндрический магнит. Механические испытания магнитных систем с целью определения усилия втягивания (вытягивания) проводили с помощью машины для механических испытаний с компьютеризированной системой измерения силы втягивания F и перемещения. Машина оснащена тензодатчиками нагрузки 1798 ДСТУ номиналами 10; 100; 1000; 10 000 кгс и датчиками перемещения захвата и производит запись кривой “усилие — перемещение” (рис. 2).

Процесс испытания “магнитной пружины” проводили следующим образом. Постоянный магнит через систему подвеса крепится к тензорезистивному датчику силы, магнитопровод — к подвижной траверсе. При движении траверсы магнит вытягивается или втягивается в магнитопровод, при этом измеряется усилие F и перемещение магнита относительно магнитопровода x .

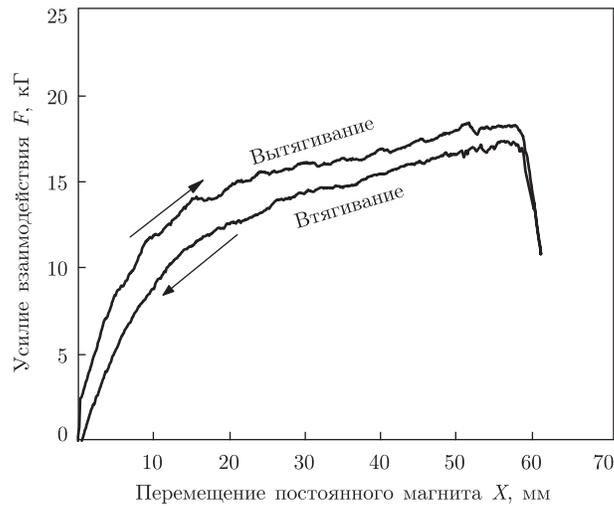


Рис. 2. Кривая зависимости усилия втягивания (вытягивания) цилиндрического магнита $\varnothing 30$ мм из сплава Nd–Fe–В с остаточной индукцией $B_r = 1,25$ Тл от перемещения магнита

Механические испытания магнитных пружин проводились при скорости движения траверсы 10 мм/мин. Усиление втягивания (вытягивания) фиксировали с помощью компьютерной системы тензорезистивным датчиком номиналом 100 кгс. Постоянный магнит крепился к верхнему неподвижному захвату через шаровую подвеску для устранения перекосов (обеспечения соосности) при нагружении.

Подвеска состояла из двух рамок, контактирующих между собой через шарик $\varnothing 10$ мм из стали ШХ 15. Погрешность регистрирующего прибора (компьютера) по нагрузке составляет $\Delta_k = 0,007$ кгс (обусловлена собственными шумами АЦП). Калибровка регистрирующего прибора проводилась с помощью эталонной гири весом 10 кгс (определенного с погрешностью $\Delta_r = 0,5\%$).

Проведенная оценка показала, что максимальная погрешность определения усилия отрыва при 10 кгс составляет $\Delta_p = \Delta_r + \Delta_k = 0,05 + 0,007$ кгс = 0,577 кгс, т. е. около 0,6%.

Экспериментальная кривая зависимости усилия втягивания и вытягивания цилиндрического магнита $\varnothing 30$ мм из сплава Nd–Fe–В с остаточной индукцией $B_r = 1,25$ Тл от перемещения магнита приведена на рис. 2.

Наиболее показательной можно считать правую часть графика: от 40 до 60 мм — сила трения между магнитом и магнитопроводом здесь мала по сравнению с магнитным взаимодействием и не оказывает существенного влияния на усиление втягивания. Можно отметить хорошее соответствие данных эксперимента с теоретическим расчетом. В эксперименте начальное усиление втягивания 17,2 кг, а расчетное — 15,8 кг. Усиление втягивания падает до нуля в положении, когда постоянный магнит полностью втягивается в магнитопровод и попадает в состояние безразличного равновесия.

Магнит прямоугольного сечения. Формула (7) справедлива и для постоянных магнитов в форме прямоугольных призм и цилиндрических секторов. Изменится только значение размагничивающего фактора, причем для тонких прямоугольных магнитов значение N будет больше, чем для цилиндров, и, соответственно, усиление втягивания возрастет при прочих равных условиях (одинаковых площадях сечения магнитов и одинаковых магнитных материалах). Если в качестве постоянного магнита использовать один из сплавов системы

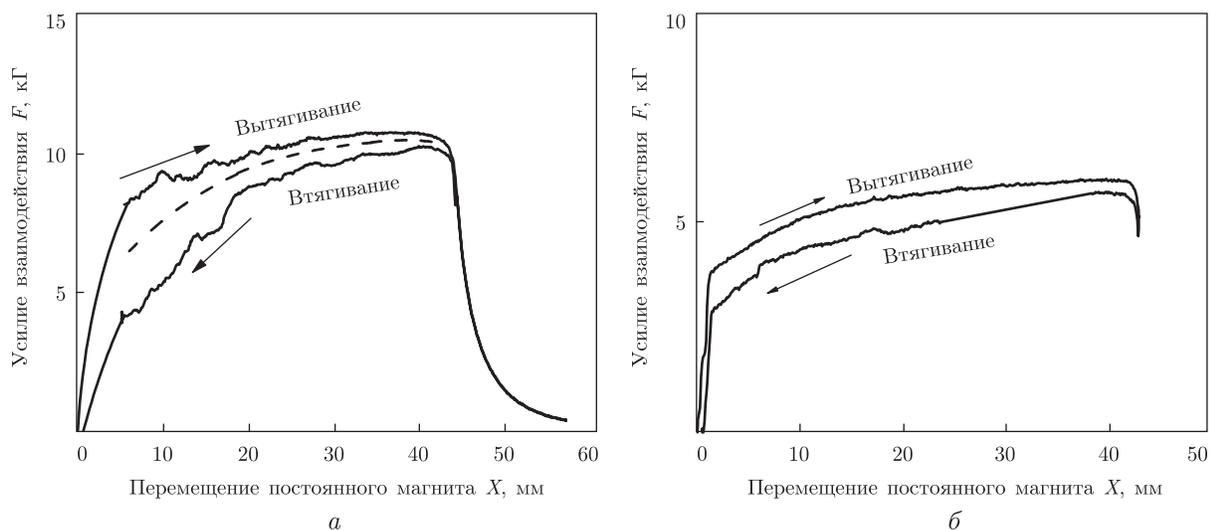


Рис. 3. Кривые зависимости усилий втягивания и вытягивания прямоугольного магнита с площадью сечения 30 мм и намагниченностью вдоль ребра 12 мм (а) и 25 мм (б) из сплава Nd–Fe–В с остаточной индукцией $B_r = 1,25$ Тл от перемещения магнита

Nd–Fe–В с максимальной на сегодняшний день остаточной индукцией ($B_r = 1,44$ Тл) [3], то усилие втягивания можно увеличить еще на 33–35%.

Размагничивающий фактор для магнита в форме прямоугольной призмы с габаритами $50 \times 25 \times 12$ мм с намагниченностью вдоль наименьшей стороны, рассчитанный теоретически, составляет 0,727. Соответственно, усилие втягивания в соответствии с формулой (8) составит:

$$F = 9,8 \text{ кг.} \quad (11)$$

Усилие втягивания такой же призмы с намагниченностью вдоль ребра 25 мм теоретически будет намного меньше — всего 5,8 кг.

Для проверки этих выводов был изготовлен массивный магнитопровод из арможелеза с полостью прямоугольного сечения $(12 + 0,1 \times 25 + 0,1)$ мм. Из двух одинаковых брусков постоянного магнита марки N38SH с габаритами $50 \times 25 \times 25$ мм (а) были вырезаны образцы с габаритами $50 \times 25 \times 12$ мм, но с разной осью легкого намагничивания: у одного вдоль ребра 12 мм, а у второго — вдоль ребра 25 мм. На обоих образцах были проведены испытания по измерению усилия втягивания — вытягивания. Данные испытаний для образца с намагниченностью вдоль ребра 12 мм приведены на рис. 3, а.

Верхняя кривая получена при вытягивании постоянного магнита, нижняя — при втягивании магнита в магнитопровод. Гистерезис объясняется тем, что сила трения в этих случаях меняет свое направление по отношению к силе F : в первом случае противодействует вытягиванию и складывается с силой F , а во втором — втягиванию постоянного магнита и вычитается из силы F . Реальная сила магнитной пружины — среднее арифметическое значение двух этих кривых (на рисунке показана штриховой линией). Увеличение расстояния между кривыми связано с увеличением силы трения при втягивании магнита на большую глубину (сила трения не постоянна). Из-за особенности крепления магнита к тяге магнит выходит из магнитопровода при перемещении 38 мм. На участке от вхождения постоянного магнита в магнитопровод до 20–

22 мм среднее значение усилия втягивания почти постоянно и составляет около 10 кг, что находится в хорошем соответствии с рассчитанным теоретически результатом — 10,2 кг. Дальнейшее уменьшение усилия втягивания, очевидно, связано с постепенным приближением материала рабочего торца магнитопровода к состоянию магнитного насыщения.

Экспериментальные кривые для образца с намагниченностью вдоль стороны 25 мм приведены на рис. 3, б. Они также находятся в хорошем соответствии с расчетным значением втягивающего усилия — 5,8 кг (размагничивающий фактор $N = 0,546$). В обоих случаях зависимость усилия втягивания от величины размагничивающего фактора очень сильная — усилие пропорционально квадрату размагничивающего фактора (при одинаковых площадях поперечного сечения втягивающегося магнита).

Следует отметить, что формула (7) применима только для так называемых закритических магнитных материалов, т.е. материалов, у которых величина размагничивающего поля не превышает коэрцитивную силу магнитного материала (в идеальном случае коэрцитивная сила материала больше его остаточной индукции). “Закритическими” материалами являются практически все спеченные постоянные магниты и магнитотвердые ферриты (бариевые, стронциевые). Все постоянные магниты на основе сплавов ЮНДК — “докритические” материалы. У них величина коэрцитивной силы в 10–20 раз меньше величины остаточной индукции и, как следствие этого, все магнитные системы с использованием этих магнитных материалов намагничиваются после сборки — для того, чтобы сохранить высокие магнитные свойства магнитной системы.

Магнитные свойства магнитной системы с “закритическими” магнитными материалами не зависят от того, каким способом намагничивались постоянные магниты — в магнитной системе или отдельно от нее.

В магнитной системе рассматриваемого вида (которую мы называем “магнитной пружиной”) магниты класса ЮНДК практически неприменимы, так как очень сильно сами себя размагничивают в положении, когда магнит выдвинут из магнитопровода.

В Украине были получены патенты на магнитные пружины, в основе работы которых лежит описанная в статье схема [4, 5].

Таким образом, выполнен расчет максимального усилия втягивания для “магнитных пружин” с круглым и прямоугольным сечениями, изготовленных из порошковых высокоэнергетических постоянных магнитов. Показано, что усилие втягивания пропорционально квадрату размагничивающего фактора, квадрату остаточной индукции магнитного материала, из которого изготовлен магнит, и площади поперечного сечения постоянного магнита на входе в магнитопровод.

Сконструирована, изготовлена и исследована магнитная пружина с диаметром магнитопровода 50 мм и постоянным магнитом, диаметр которого 30 мм, длина 60 мм. Сила втягивания такой пружины составляет 17 кг. Наблюдается хорошее соответствие теоретических расчетов и экспериментальных результатов.

1. Цивилицин В. Ю., Мильман Ю. В., Бондар И. Б. Современные магнитотвердые материалы на основе РЗМ // Журн. функц. материалов. — 2008. — 2, № 2. — С. 42–47.
2. Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергия, 1980. — 488 с.
3. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики: Справочник / Отв. ред. В. К. Тартаковский. — Киев: Наук. думка, 1989. — 864 с.

4. Цивилицин В. Ю., Жежерун А. П. Пат. 2000127143 (Украина). Магнитная пружина. № 958. – Оpubл. 16.07.2001. – Заявл. 12.12.2000.
5. Цивилицин В. Ю., Жежерун А. П. Пат. 2000127144 (Украина). Автоматическая магнитная пружина. № 959. – Оpubл. 16.07.2001. – Заявл. 12.12.2000.

Институт проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 19.02.2010

V. Yu. Tsivilitsin, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **Yu. V. Milman**,
V. A. Goncharuk, **I. B. Bondar**

Application of sintered high-energy permanent magnets at the elaboration of “magnetic springs”

A magnetic system, in which a high energy powder permanent magnet is drawing into a magnetic circuit, the so-called “magnetic spring”, is considered. The calculation of the maximal force of drawing is executed for permanent magnets with circular and rectangular cross-sections. The magnetic spring made of a soft magnetic material of 50 mm in diameter with a permanent magnet of 30 mm in diameter and 60 mm in length was designed, made, and investigated. The drawing force of such a spring was 17 kg. There is a good accordance of theoretical calculations and experimental results.