

В.Ю. ЦИВІЛІЦІН, Ю.В. МІЛЬМАН, В.А. ГОНЧАРУК, І.Б. БОНДАР

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України
(Вул. Кржижановського, 3, Київ 03680; e-mail: ibond@ipms.kiev.ua)

РОЗРАХУНОК ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛИ ВТЯГУВАННЯ МАГНІТНИХ ПРУЖИН ДВОХ ТИПІВ

УДК 537.634, 53.06

Запропоновано конструкції магнітних пружин двох типів, розроблено методи розрахунку їх сили втягування. Отримано формули для підрахунку сили втягування на основній ділянці силової характеристики пружин. Експериментальні дані знаходяться у добрій відповідності до теоретичних розрахунків. Силі характеристики запропонованих конструкцій магнітних пружин можна змінювати залежно від конкретного застосування. Проведено експериментальну перевірку отриманих формул. Показано шляхи зміни силових характеристик магнітних пружин відповідно до вимог конкретних застосувань.

Ключові слова: магнітна пружина, постійний магніт, магнітопровід, сила втягування, залишкова магнітна індукція B_r , розмагнічувальний чинник N , коерцитивна сила.

1. Вступ

Існує багато типів магнітних пружин. Переважна їх більшість має степеневу залежність сили втягування від переміщення. Але найбільший практичний інтерес становлять пружини, зусилля яких мало залежать від переміщення [1, 2].

Авторами цієї статті упродовж останніх двох років були детально досліджені два типи магнітних пружин з майже постійною силою втягування (зі зміною величини в межах 15%) на довжині робочого ходу пружини. Ці типи пружин ми вважаємо найбільш перспективними для більшості конкретних застосувань.

Перший тип магнітної пружини можна умовно назвати “постійний магніт – магнітопровід” (рис. 1). У цьому типі пружин використовується взаємодія постійного магніту (як правило, з великим енергетичним добутком) з магнітопроводом, виготовленим із магнітно-м’якого матеріалу.

Другий тип магнітної пружини можна умовно назвати “два постійні магніти” (рис. 2). Вона складається з трубчатого постійного магніту з аксіальною намагніченістю, усередині якого може розміщатися інший циліндричний або кільцевий магніт з намагніченістю, що є антипаралельною намагніченості зовнішнього магніту. Ця конструкція

допускає застосування торцевих дискових магнітопроводів для зміни форми силової характеристики (розділ 4).

Авторами розроблено методи розрахунку і отримано формули для визначення величини сили втягування на основній ділянці силових характеристик, побудовано моделі обох типів магнітних пружин, а також запропоновано шляхи зміни форми силової характеристики на початковій і кінцевій ділянках. Усі отримані результати експериментально перевірено на автоматизованій установці для механічних випробувань Р-5.

2. Побудова фізичної моделі і виведення формули для визначення сили втягування магнітної пружини першого типу

На рис. 1 зображено принципову схему роботи магнітної пружини першого типу “постійний магніт–магнітопровід”. Постійний магніт може бути циліндром з діаметральною намагніченістю або прямокутною призмою з намагніченістю, перпендикулярною напрямку переміщення.

Переріз магніту, перпендикулярний напрямку переміщення пружини, може бути також еліпсом, ромбом або трапецією: в усіх випадках пружина працюватиме, правда, з меншою силою втягування (через зменшення розмагнічувального чинника). Вимога до форми магнітопроводу – наявність у ньому порожнини з поперечним перерізом, що

© В.Ю. ЦИВІЛІЦІН, Ю.В. МІЛЬМАН,
В.А. ГОНЧАРУК, І.Б. БОНДАР, 2014

відповідає поперечному перерізу постійного магніту (бажано, щоб магніт заходив у неї по ковзній посадці).

Для найбільшої ефективності пружини магнітопровід повинен пропускати увесь магнітний потік, що створюється постійним магнітом. Чим менше проміжок між полюсами магніту і магнітопроводом, тим менше розсіювання магнітного потоку і тим більша сила втягування магнітної пружини. Відстань між бічними сторонами (не полюсами) постійного магніту і магнітопроводу може бути довільною – вона практично не впливає на силові характеристики магнітної пружини даного типу.

Раніше нами було показано [3], що сила втягування розраховується за формулою:

$$F = N^2(B_r^2/2\mu_0)S, \quad (1)$$

де N – розмагнічувальний чинник, залежний тільки від геометричної форми магніту; B_r – залишкова індукція матеріалу, з якого виготовлений постійний магніт; S – площа поперечного перерізу постійного магніту.

Формула (1) отримана з використанням методу віртуальних переміщень. При втягуванні магніту на відстань dx здійснюється робота:

$$dA = F dx, \quad (2)$$

де F – сила втягування.

З іншого боку, усередині постійного магніту до введення його в магнітопровід існувало розмагнічувальне поле B [4]:

$$B = -NB_r, \quad (3)$$

зумовлене існуванням полюсів магніту. У цьому виразі N – розмагнічувальний чинник, B_r – залишкова індукція магнітно-твердого матеріалу. Після введення магніту в магнітопровід це поле зменшується майже до нуля і розмагнічувальний чинник можна умовно також вважати рівним нулю. Тому, у нашому наближенні, можна вважати, що вся енергія поля розмагнічування іде на виконання роботи по переміщенню постійного магніту. Щільність енергії магнітного поля w :

$$w = B^2/2\mu_0 = N^2 B_r^2/2\mu_0, \quad (4)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – універсальна магнітна стала.

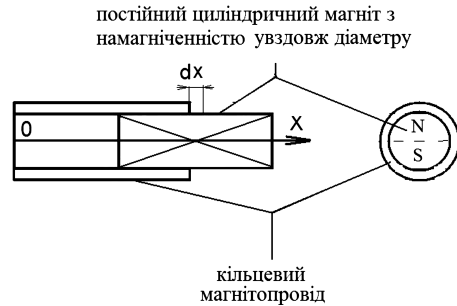


Рис. 1. Принципова схема роботи магнітної пружини з циліндричним магнітом з діаметральною намагніченістю

При переміщенні магніту на відстань dx відбувається зміна енергії W магнітного поля:

$$dW = w dV, \quad (5)$$

де w – щільність енергії магнітного поля, V – об'єм, в якому сталася зміна поля.

У нашому випадку

$$dV = S dx, \quad (6)$$

де S – площа перерізу магніту перпендикулярно осі циліндра.

Підставляючи (4) і (6) в (5), отримуємо

$$dW = N^2(B_r^2/2\mu_0)S dx. \quad (7)$$

Прирівнюючи (2) і (7) $dA = dW$ і скорочуючи на dx , отримуємо простий вираз для сили втягування F постійного магніту в магнітопровід (1).

Сила втягування, отримана відповідно до формули (1), знаходиться в хорошій відповідності з експериментальними даними. Типова експериментальна силова характеристика такої пружини наведена на рис. 2. Відмінність силових характеристик, отриманих при втягуванні та витягуванні, зумовлена наявністю сили тертя між постійним магнітом та магнітопроводом: при витягуванні сила тертя додається до сили втягування (верхня крива), а при втягуванні – віднімається (нижня крива) (рис. 3, 4). На цю конструкцію магнітної пружини отримано патент на корисну модель [5].

Авторами експериментально також було доведено сильний вплив на силу втягування розмагнічувального чинника N [3] на магнітних пружинах з використанням постійних магнітів у формі прямокутних паралелепіпедів з однаковою площею попе-

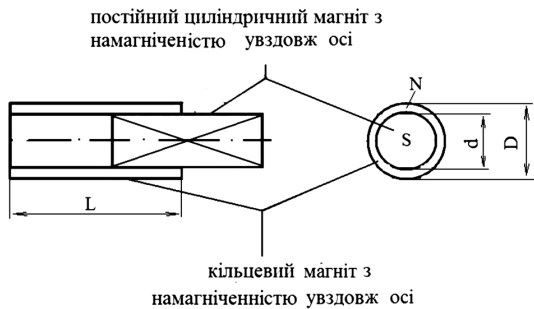


Рис. 2. Принципова схема роботи магнітної пружини “два постійні магніти”: D і d – зовнішні діаметри кільцевого та циліндричного магнітів, L – довжина зовнішнього магніту

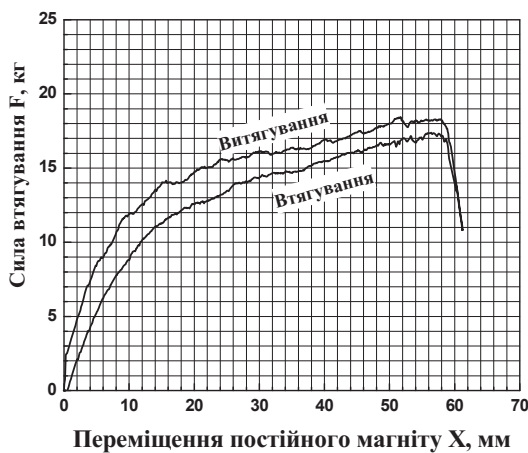


Рис. 3. Крива залежності сили втягування циліндричного магніту $\varnothing 30$ мм з діаметральною намагніченістю із сплаву Nd-Fe-B із залишковою індукцією $B_r = 1,25$ Тл від переміщення магніту всередині трубчастого магнітопроводу

речного перерізу, але з різною відстанню між полюсами. Зусилля відрізнялося в 1,7 раза відповідно до формули (1).

До переваг цього типу магнітної пружини можна віднести легко регульовану довжину ходу. Робочий хід пружини залежить від довжини магніту, що використовується. Якщо потрібний більший хід – використовується довший магніт. Сила втягування при цьому не змінюється.

До недоліків цієї конструкції можна віднести велику силу притягування полюсів постійного магніту до магнітопроводу. Вона може становити 30–40% від сили втягування при поганому центруванні магніту в магнітопроводі. Обидва полюси магніту повинні знаходитися на однаковій відстані від магнітопроводу для зменшення сили тертя, яка

може призводити до помітного гістерезису на силовій характеристиці пружини (рис. 3).

У наших експериментах використовувалися шліфовані магніти, що входять в магнітопровід з електротехнічної сталі E12 по ковзній посадці. Для зменшення сили тертя можна використати тонкий шар немагнітного матеріалу з малим коефіцієнтом тертя. Цей шар також може служити корозійним захистом постійного магніту від вологого повітря і центрувати полюси магніту на однаковій відстані від магнітопроводу.

3. Побудова фізичної моделі і виведення формули для визначення сили втягування магнітної пружини другого типу

Ширші можливості, на наш погляд, є у конструкції магнітної пружини, яку можна назвати “два постійні магніти”. У конструкції цього типу використовуються зовнішній кільцевий магніт і внутрішній циліндричний магніт (чи складнішої форми, але з циліндричною симетрією, наприклад, усічений конус). Намагніченість обох магнітів – аксіальна і антипаралельна. Принципова схема такої пружини наведена на рис. 2.

Внутрішній магніт складнішої форми може згодитися при зміні силової характеристики магнітної пружини. У цій конструкції між магнітами може бути присутнім тонке немагнітне кільце для забезпечення деяких потрібних змін на силовій характеристиці пружини. Присутність такого кільця дещо знижує силу втягування на основній ділянці внаслідок зменшення площі поперечного перерізу магніту. Це зниження легко може бути оцінене за виведеною формулою (12).

Силу втягування можна змінювати, зменшуючи площу полюса внутрішнього магніту. Можна зменшувати діаметр внутрішнього магніту, а можна зробити в нім аксіальний отвір, який виявляється дуже корисним для прикріплення магніту до тяги. Річ у тім, що постійні магніти системи Nd-Fe-B мають твердість розжареної сталі, і досить крихкі, що робить практично неможливим нанесення на них будь-якого різьблення.

Розглянемо детальне виведення формули для величини сили втягування конструкції цього типу.

Раніше було показано [6], що сила втягування подібної магнітної системи F добре описується

формулою:

$$F = B_r H S / \mu_0, \quad (8)$$

де S – площа поперечного перерізу внутрішнього магніту, B_r – залишкова індукція матеріалу, з якого виготовлені постійні магніти, μ_0 – універсальна магнітна стала, H – поле всередині зовнішнього кільцевого магніту, яке визначається за формулою (9) [4]:

$$H = B_r [(1 + D^2/L^2)^{-0,5} - (1 + d^2/L^2)^{-0,5}], \quad (9)$$

де D і d – зовнішній і внутрішній діаметр трубчастого магніту, L – його довжина.

Якщо залишкова індукція обох постійних магнітів однакова, то з (8) і (9) отримуємо

$$F = B_r^2 [(1 + D^2/L^2)^{-0,5} - (1 + d^2/L^2)^{-0,5}] S / \mu_0. \quad (10)$$

У даному випадку:

$$S = \pi d^2 / 4. \quad (11)$$

Підставляючи (11) в (10), отримуємо

$$F = B_r^2 [(1 + D^2/L^2)^{-0,5} - (1 + d^2/L^2)^{-0,5}] \pi d^2 / 4 \mu_0. \quad (12)$$

Отже, ми отримали вираз для залежності величини сили втягування пружини від геометричних розмірів магнітів, що використовуються.

Якщо проводити порівняння з магнітною пружиною першого типу, то при однакових діаметрах друга пружина забезпечує силу втягування на 40–100% більше. До переваг цієї магнітної пружини також можна віднести незначне тяжіння внутрішнього магніту до зовнішнього (значного гістерезису в силевій характеристиці, зумовленого присутністю сили тертя, в експериментах не виявлено). Типова експериментальна силова характеристика пружини такого типу з $D = 40$ мм і $L = 35$ мм наведена на рис. 4.

На цю конструкцію магнітної пружини отримано патент України на корисну модель [7].

Мабуть, єдиним недоліком цієї конструкції можна вважати не таке просте збільшення довжини ходу пружини, як у разі першої конструкції. Річ у

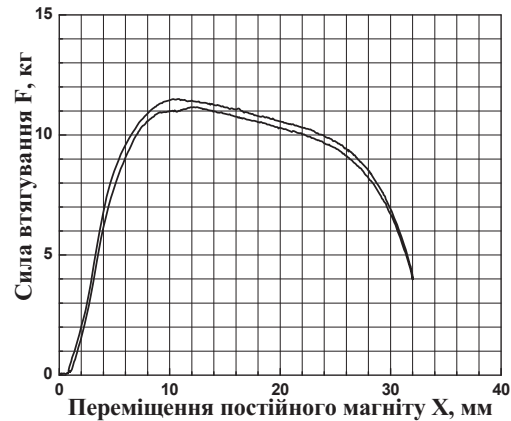


Рис. 4. Залежність сили втягування F від зменшення середника X для магнітної циліндричної пружини: зовнішній і внутрішній діаметри трубчастого магніту 40 мм і 20 мм, його довжина 30 мм, довжина внутрішнього магніту 35 мм, діаметр 19,7 мм

тім, що при збільшенні довжини ходу (без відповідного збільшення зовнішнього діаметра пружини) сила втягування помітно знижується відповідно до формули (12).

Перейдемо до переваг другої конструкції.

По-перше, як говорилося раніше, вона є потужнішою на 40–100% при такому самому діаметрі зовнішнього магніту.

По-друге, її можна оптимізувати до конкретного застосування залежно від того, який параметр у цьому застосуванні є основним. Наприклад, можна розрахувати діаметри магнітів, виходячи з довжини ходу пружини і необхідного робочого зусилля.

По-третє, легко можна забезпечити зусилля “докладування”, яке може в 2–4 рази перевищувати робочу силу пружини, причому це ніяк не вплине на роботу пружини на основній ділянці.

По-четверте, ділянка наростання сили пружини може бути практично повністю усунена (рис. 4, зміщення до 10 мм).

По-п’яте, сила тертя між магнітами, що переміщуються, незначна, і не потрібно точне центрування магнітів, як у разі магнітної пружини першого типу.

4. Конструкція другого типу з торцевим магнітопроводом

На основі конструкції другого типу, наприклад, легко виготовити дверний доводчик з підвищеним

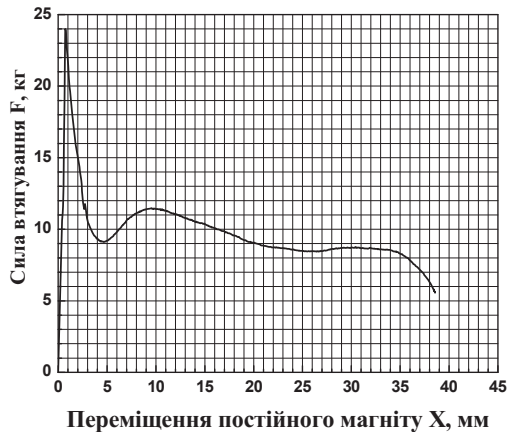


Рис. 5. Силова характеристика пружини другого типу з торцевим магнітопроводом: зовнішній і внутрішній діаметри трубчастого магніту 40 мм і 28 мм, довжина внутрішнього магніту 35 мм, діаметр 25 мм



Рис. 6. Силова характеристика магнітної пружини подвоєної довжини: довжина трубчастого магніту 70 мм, зовнішній діаметр 40 мм, внутрішній діаметр 25 мм

ресурсом експлуатації – вона задовольняє усі вимоги, що пред’являються до цих пристроїв: сила втягування близько 100–150 ньютон на основній ділянці і необхідне “доклацування” для остаточного закриття дверей. “Доклацування” забезпечується введенням циліндричного магнітопроводу на неробочий торець пружини. Типова силова характеристика такої магнітної пружини з торцевим магнітопроводом наведена на рис. 5.

Якщо потрібно ще більше зусилля “доклацування”, то на правий торець внутрішнього магніту також можна помістити торцевий дисковий магнітопровід.

1026

Можна отримати будь-яке зусилля “доклацування” в інтервалі значень від нуля до максимального шляхом введення немагнітного прошарку необхідної товщини між торцевим магнітопроводом і внутрішнім магнітом. Тобто, крива на рис. 5 може починатися з будь-якої точки відрізка осі ординат від нуля до 25 кг. Також зусилля “доклацування” може регулюватися завдяки зміні товщини торцевого магнітопроводу.

Ця конструкція була успішно застосована нами в зворотному клапані, що використовується при промиванні нафтових свердловин. Клапан спрацьовує при збільшенні тиску до 40 атм і закривається, коли тиск падає менше 10 атм. Таку силову характеристику забезпечити за допомогою звичайних механічних пружин якщо і можливо, то набагато складніше.

5. Вплив торців магнітів на силову характеристику

У конструкції другого типу велику роль у формуванні силової характеристики відіграють торці магнітів, при цьому їх вплив збільшується при збільшенні відношення довжини пружини до її діаметра. На типовій силовій характеристиці пружини зазвичай є присутнім два максимуми, причому перший завжди є більшим за другий (рис. 6), оскільки в його формуванні беруть участь обидва полюси магніту. “Поличка” силової характеристики (на ділянці 30–60 мм) добре розраховується за формулою (12), а максимуми є наслідком впливу торців.

Ми експериментально довели це, виготовивши пружину подвоєної довжини при незмінному діаметрі. При цьому максимуми стали різкіше, а “поличка” опустилася до зусилля в 5,5 кг (рис. 6).

Якщо необхідно отримати плавнішу силову характеристику пружини, то ці максимуми можна “зрізувати” за рахунок зменшення площі перерізу торців. Замінивши центральний циліндричний магніт на складений магніт, що складається з двох усічених конусів із загальною основою, можна отримати практично постійну силу втягування на досить довгій пружині.

6. Висновки

1. Запропоновано конструкції магнітних пружин двох типів “магніт–магнітопровід” та “два постійні магніти”, на які отримано патенти України [5, 7].

2. Виведено формули залежності величини сили втягування на основній ділянці переміщення. Ці формули добре підтверджуються проведеними експериментами.

3. На підставі запропонованих моделей можна розраховувати параметри магнітних пружин, наприклад, залежно від довжини ходу пружини і необхідного зусилля.

4. На базі отриманих формул можна провести оцінки придатності запропонованих конструкцій для їх використання в конкретних застосуваннях.

5. Також можна провести оптимізацію магнітної пружини: наприклад, при яких геометричних розмірах досягатиметься максимальна сила втягування, або якою має бути магнітна пружина, щоб при однаковій силі втягування на її виготовлення знадобилася б мінімальна кількість (по масі) магнітного матеріалу.

6. Конструкція “два постійні магніти” дозволяє отримати дуже різноманітні форми силової характеристики за рахунок використання магнітопроводів, що задовольняють практично будь-які конкретні застосування.

1. K. Qian, P. Zeng, W.-M. Ru, and H.-Y. Yuan, IEEE Trans. Magnetism **39**, 1 (2003).
2. <http://www.linmot.com/products/magnetic-spring/>.
3. В.Ю. Цивіліцин, Ю.В. Мільман, В.А. Гончарук, І.Б. Бондар, Доповіді НАН України № 9, 78 (2010).
4. В.Ю. Цивіліцин, Ю.В. Мільман, В.А. Гончарук, І.Б. Бондар, Доповіді НАН України № 1, 81 (2011).
5. В.Ю. Цивіліцин, А.П. Жежерун, Патент на корисну модель № 958 U F16F6/00, заявка № 2000127143 від 12.12.2000, опубл. 16.07.2001. Магнітна пружина.
6. А.Б. Альман, А.Н. Герберг, П.А. Гладышев и др., *Постоянные магниты. Справочник*, под ред. Ю.М. Пятинина (Энергия, Москва, 1980).

7. В.Ю. Цивіліцин, Патент на корисну модель UA 83233 U заявка u201304109 від 02.04.201 опубл. 27.08.2013.

Одержано 25.07.14

*В.Ю. Цивіліцин,
Ю.В. Мільман, В.А. Гончарук, І.Б. Бондар*

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ ВТЯГИВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПРУЖИН ДВУХ ТИПОВ

Резюме

Предложены конструкции магнитных пружин двух типов, разработаны методы расчета их силы втягивания. Получены формулы для подсчета силы втягивания на основном участке силовой характеристики пружин. Экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с теоретическими расчетами. Силовые характеристики предложенных конструкций магнитных пружин можно изменять в зависимости от конкретного приложения. Проведена экспериментальная проверка полученных формул. Показаны пути изменения силовых характеристик магнитных пружин в соответствии с требованиями конкретных приложений.

*V. Yu. Tsvilitsin,
Yu. V. Milman, V. A. Goncharuk, I. B. Bondar*

CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE RETRACTING FORCE FOR MAGNETIC SPRINGS OF TWO TYPES

Summary

Designs for magnetic springs of two types have been proposed, and the methods of calculation of their retracting forces have been developed. Formulas are obtained for the retracting force in the main section of spring force characteristics. Experimental data are in good agreement with the results of theoretical calculations. The force characteristics of the proposed magnetic spring constructions can be varied for a specific application. The derived formulas are verified experimentally. Ways to change the force characteristics of magnetic springs according to specific requirements are demonstrated.