

В.Ю. ЦИВІЛІЦІН, В.А. ГОНЧАРУК, І.В. ГОНЧАРОВА, М.О. ЄФІМОВ

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України
(Вул. Омеляна Прицака, 3, Київ, 03142)

УДК 621.318;537.634

ВПЛИВ ЗМІНИ КОНСТРУКЦІЇ МАГНІТНОЇ ПРУЖИНИ НА ЇЇ СИЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведено оцінку потенційних енергетичних можливостей магнітних пружин. Розраховано теоретичну границю магнітостатичної енергії, накопиченої в пружині, яку можна перетворити на механічну. Проведено порівняльний аналіз силових характеристик двох моделей магнітних пружин (базової моделі магнітної пружини “два постійні магніти” та магнітної пружини з магнітопроводом замість зовнішнього постійного магніту). Показано перспективність використання конструкції магнітної пружини з магнітопроводом.

Ключові слова: магнітна пружина, теоретична границя магнітостатичної енергії, співвідношення сила–переміщення.

1. Вступ

Постійні магніти та магнітом’які матеріали широко використовуються практично у всіх галузях науки і техніки. Одним із основних їх застосувань є використання у складі магніто-механічних пристроїв, зокрема магнітних пружин. Слід зазначити, що магнітні пружини на основі постійних магнітів сильно відрізняються між собою. Внаслідок цього використання того чи іншого магніту в конструкції магнітної пружини зумовлено технічними вимогами до силової характеристики магнітно-механічного пристрою [1].

Використання пружин з постійними магнітами досить перспективне і має низку безперечних переваг над звичайними механічними пружинами. Так, наприклад, магнітні пружини вбудовуються в прецизійні приводи позиціонування для пасив-

ної компенсації гравітації, а також в прецизійній віброізоляції для зниження динамічної жорсткості [2].

На відміну від звичайних механічних пружин пружини на постійних магнітах можуть працювати при нижчих температурах, тоді коли пружинні сталі вже втрачають свої механічні властивості, а характеристики магнітних пружин зі зниженням температури залишаються незмінними і навіть трохи збільшуються (наприклад, зусилля втягування дещо підостає).

При використанні в пружинах магнітотвердих матеріалів на основі системи Sm–Co можна істотно підвищити корозійну стійкість магнітних пружин [3]. Такі пружини можуть дуже довго працювати без зміни своїх механічних характеристик в умовах агресивних середовищ, морської води або різних технологічних рідин в нафтових свердловинах.

На основі магнітної пружини [4] нами було розроблено зворотний магнітний клапан, який успішно використовується у складі стандартного гірничодобувного обладнання на нафтопромислах Азербайджану. Використання пружини на постійних магнітах вирішило проблеми зі зворотним кла-

Цитування: Цивіліцин В.Ю., Гончарук В.А., Гончарова І.В., Єфімов М.О. Вплив зміни конструкції магнітної пружини на її силові характеристики. *Укр. фіз. журн.* **69**, № 10, 765 (2024).

© Видавець ВД “Академперіодика” НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

ISSN 0372-400X. *Укр. фіз. журн.* 2024. Т. 69, № 10

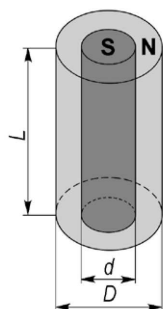


Рис. 1. Базова модель магнітної пружини “два постійні магніти”. S, N – полюси магніту, D – діаметр кільцевого магніту d – діаметр внутрішнього магніту, L – довжина обох магнітів

паном на звичайній механічній пружині, які були пов’язані з тривалістю служби та агресивністю середовища.

Також суттєвою перевагою магнітних пружин над механічними є різноманіття їх форм та можливість адаптації їх силових характеристик до конкретних застосувань. Досить просто можна збільшити довжину ходу пружини, так, наприклад, два стандартні постійні магніти у формі кілець (з однаковими діаметрами і різними висотами) складаються торцями, при цьому внутрішній магніт також збільшується по довжині (і може бути складовим або цілісним). Можна отримувати досить великий спектр магнітних пружин, використовуючи стандартні кільця, що випускаються промисловістю, з постійних магнітів (магнітотвердих феритів, неодимових або самарій-кобальтових магнітів). Тобто, магнітні пружини можна збирати як конструктор, пристосовуючи їх під конкретне застосування.

Проектування складних магнітних пружин, як правило, здійснюється за індивідуальним замовленням за допомогою побудови кривих “сила – переміщення”.

Для оцінки потенційних можливостей магнітних пружин ми розраховували верхню теоретичну межу енергії, яка може бути накопичена в магнітній пружині. Теоретична оцінка магнітотвердого матеріалу проводилася на основі енергетичного добутку магнітотвердого матеріалу $(BH)_{\max}$.

Раніше [4] ми вже розглядали кілька перспективних моделей магнітних пружин. Так, наприклад, на рис. 1 наведена базова модель магнітної пружини “два постійні магніти”. Ця конструкція

може бути доповнена торцевими дисковими магнітопроводами (для зменшення фактора, що розмагнічує, обох постійних магнітів у початковому стані і, як наслідок, більшому використанню потенціальної енергії постійних магнітів). У такому варіанті її енергія близька до енергії $(BH)_{\max}$ матеріалу постійного магніту такого ж обсягу.

Метою цієї роботи було дослідження та порівняння силових характеристик базової моделі магнітної пружини “два постійні магніти” та магнітної пружини з магнітопроводом замість зовнішнього постійного магніту з ціллю здешевлення конструкції магнітної пружини та зміни форми її силової характеристики. У зв’язку з цим було проведено низку модельних експериментів та порівняння експериментальних даних з теоретичними припущеннями та оцінками.

2. Матеріал та методика дослідження

Досліджувалися два варіанти магнітних пружин:

1. Базова модель магнітної пружини “два постійні магніти” – це два постійних магніти з магнітотвердих матеріалів на основі системи неодим-залізо-бор марки N40. Діаметр зовнішнього магніту становив 40 мм, діаметр внутрішнього 25 мм із довжиною магнітів – 40 мм. Переміщення постійних магнітів один щодо одного збігається з напрямком намагніченості.

2. Змінений варіант базової моделі являв собою магнітну пружину з тим же внутрішнім постійним магнітом, при цьому зовнішній постійний магніт був замінений на кільце з електротехнічної сталі 10895 (ГОСТ 3836-83), за формою та розмірами ідентичне зовнішньому постійному магніту базової моделі магнітної пружини.

Дослідження силових характеристик двох варіантів магнітних пружин проводилися на експериментальній установці для механічних випробувань (на базі розривної машини Р-5) при швидкості переміщення осердя пружини, що дорівнює 1 мм/хв.

3. Експериментальні результати та їх обговорення

При використанні магнітної пружини діаметром 40 мм та довжиною 40 мм об’єм магнітного матеріалу становить: $V = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. Енергетичний добуток магнітотвердого матеріалу, що використовується в базовій моделі магнітної пружини, $(BH)_{\max}$ становить 320 кДж/м³. Тоді теоретично можлива

енергія, що може бути збережена у цьому об'ємі становить $E = 16$ Дж.

Для магнітотвердого матеріалу N55 з максимальним на сьогодні $(BH)_{\max} = 440$ кДж/м³ маємо $E = 22$ Дж, тобто теоретична межа потенційних енергетичних можливостей магнітотвердих матеріалів у реально використовуваних об'ємах ($5 \cdot 10^{-5}$ м³) становить близько ~ 20 Дж. Таким чином, у реальних гарних магнітних пружинах можна запасати енергію приблизно 10 Дж і здійснювати таку ж за величиною роботу. Це досить висока величина для можливих конкретних застосувань магнітних пружин.

Розглянемо варіант заміни магнітотвердого матеріалу на магнітом'який. Енергетичний добуток магнітом'яких матеріалів на три-чотири порядки менший (через невелику коерцитивну силу), ніж у магнітотвердих матеріалів, що детально проілюстровано авторами роботи [5]. Намагатися запасати енергію в них немає сенсу. Хоча їх можна успішно використовувати для збільшення ККД магнітотвердих матеріалів, які входять в магнітну систему.

Це можна пояснити так: для відриву постійного магніту, що лежить полюсом на феромагнітній площині, потрібна сила F (рис. 2, а). Якщо магніт накрити магнітопроводом з магнітом'якого матеріалу, що дозволяє повністю використовувати частково задіяний другий полюс магніту (рис. 2, б), то зусилля відриву F збільшується в 3–5 разів [5].

Таким чином, використання магнітопроводу:

- змінює фактор постійного магніту, який відповідає за розмагнічування, тобто збільшується запасена енергія постійного магніту, оскільки починає повністю використовуватися другий полюс магніту;
- дозволяє трансформувати величину магнітної індукції внаслідок безперервності потоку магнітної індукції.

У багатьох магнітом'яких матеріалів індукція насичення перевищує 2 Тл [5], тоді як залишкова індукція магнітотвердих матеріалів важко дотягує до 1,4 Тл. Оскільки зусилля відриву пропорційно квадрату індукції, то зусилля відриву під час використання магнітопроводу відразу зростає вдвічі.

З точки зору ціни: магнітом'які матеріали на порядок дешевші за магнітотверді, так, наприклад, вартість кілограма неодимових магнітів середнього розміру (100–200 грам) коштує близько 70 до-

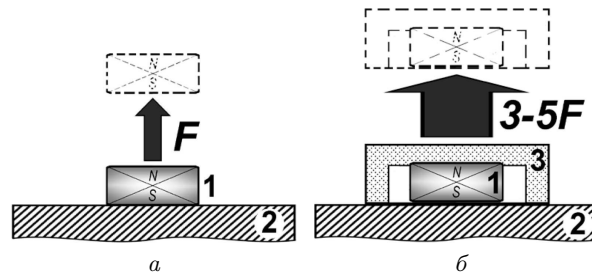


Рис. 2. Схема використання магнітопроводу для зміцнення робочої точки постійного магніту на кривій розмагнічування: постійний магніт на феромагнітній площині (а), такий самий постійний магніт і з магнітопроводом (б), постійний магніт (1), феромагнітна площина (2), магнітопровід (3)

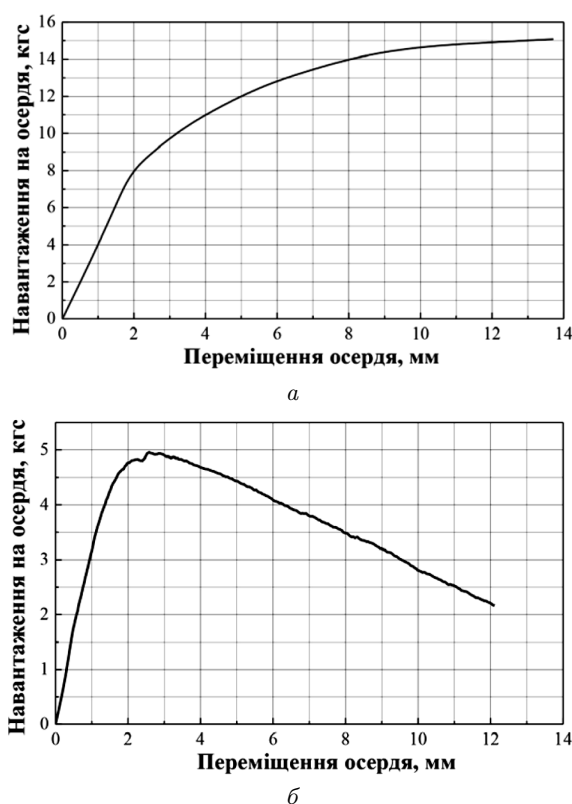


Рис. 3. Силкові характеристики магнітних пружин: базова модель (а) та пружина з магнітопроводом замість зовнішнього постійного магніту (б)

ларів, а вартість електротехнічної сталі або армозаліза становить 6–8 доларів за кілограм. Тому використання магнітом'яких матеріалів у магнітних пружинах цілком виправдане. Це здешевлює виріб та сприяє більш повному використанню потенційних можливостей магнітотвердих матеріалів.

Результати дослідження силових характеристик базової моделі магнітної пружини та пружина з магнітопроводом замість зовнішнього постійного магніту наведено на рис. 3.

Силові характеристики на основній ділянці ходу двох пружин сильно відрізняються, так у базовій моделі зусилля рівномірно зростає і виходить на плічку, а у пружини з магнітопроводом силова характеристика теж спочатку зростає і виходить на максимум, а після цього зусилля втягування спадає.

Роботу обох пружин можна порахувати, як площу під графіком силових характеристик: енергія, що накопичена в магнітній пружині із зовнішнім магнітопроводом становить 0,43 Дж, що приблизно втричі менше, ніж у базовій моделі пружини 1,25 Дж. Це експериментально підтверджує теоретичне припущення про недоцільність запасати механічну енергію в магнітом'яких матеріалах.

Але разом з цим магнітна пружина із зовнішнім магнітопроводом має й свої переваги:

- для деяких застосувань може виявитися потрібною та корисною похила силова характеристика (наприклад, у доводчиках дверей, щоб запобігти сильному удару при закритті),
- пружина із зовнішнім магнітопроводом має гарне екранування (замикання) магнітного поля постійного внутрішнього магніту.

Швейцарський бренд MagSpring® виробляє схожу магнітну пружину із зовнішнім магнітопроводом [6]. Однак у їх конструкції полюса постійного магніту ковзають вздовж магнітопроводу, що вимагає точного юстування постійного магніту в порожнині магнітопроводу, іншим чином магніт прилипатиме до магнітопроводу і велика сила тертя, яка виникає, перешкоджає руху магніту. Зусилля такої пружини на ділянці силової характеристики постійно, але в 2 рази менше, ніж у нашої базової моделі такого ж діаметра. У промислової магнітної пружини також немає можливості змінювати форму силової характеристики за рахунок торцевих магнітопроводів. Наша пружина із зовнішнім кільцевим магнітопроводом, на відміну від промислової магнітної пружини, не має проблем із силою тертя. У нашій конструкції вона дуже мала, оскільки постійний магніт не притягується бічною поверхнею до магнітопроводу (полюси магніту знаходяться на його торцях).

4. Висновки

Досліджена конструкція магнітної пружини із заміною зовнішнього постійного магніту на магнітопровід може бути перспективна через особливу форму своєї силової характеристики. Очевидною перевагою такої пружини є нижча вартість матеріалів, що входять до складу її конструкції. Також за рахунок використання магнітом'якого зовнішнього кільця досягається практично повне екранування постійного магніту – поза конструкцією магнітне поле майже відсутнє. Конструкція не вимагає точного юстування, оскільки відсутня небажана сила тертя між рухомими частинами магнітної пружини.

1. M.A. Woodward, M. Sitti. Universal custom complex magnetic spring design methodology. *IEEE Trans. Magn.* **54**, 1 (2017).
2. R. Zhou, Zh. Huang, H. Chen, J. Wu, J. Che, X. Chen, W. Jiang. Inverse design method of magnetic springs with customized force-displacement relationship over a wide range. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **71**, 9394 (2024).
3. В.Ю. Цивіліцин, Ю.В. Мільман, В.А. Гончарук, І.В. Бондар. Магнитная пружина из двух постоянных магнитов. *Доповіди Національної Академії наук України* **1**, 81 (2011).
4. В.Ю. Цивіліцин. Патент України на корисну модель UA 83233 від 27.08.2013. Магнітна пружина, F16F6/00.
5. L.R. Moskowitz. *Permanent Magnet Design and Application Handbook* (Krieger Publishing Company, 1995) [ISBN-10: 0894647687].
6. LinMot®. *MagSpring*. <https://linmot.com/products/magspring/>.

Одержано 11.06.24

V.Yu. Tsvilitsin, V.A. Goncharuk,
I.V. Goncharova, M.O. Iefimov

CHANGE IN THE MAGNETIC SPRING DESIGN AND ITS INFLUENCE ON THE SPRING FORCE CHARACTERISTICS

The potential energy capabilities of magnetic springs have been estimated. The theoretical limit of the magnetostatic energy accumulated in the spring, which can be converted into mechanical energy, has been calculated. A comparative analysis of the force characteristics of two magnetic spring models – the basic model “two permanent magnets” and a magnetic spring with a magnetic core instead of an external permanent magnet) has been carried out. The prospects of using the magnetic spring design with a magnetic core have been shown.

Keywords: magnetic spring, theoretical limit of magnetostatic energy, force-displacement ratio.