

## АНОТАЦІЯ ЦИКЛУ РОБІТ

**А.Ф. Кравця, Ю.І. Джежері та О.Ю.Салюк (ІМаг НАН України та МОН України),**

**"Магнітні смарт-матеріали для систем сенсорики та мікроактуаторів",**

**висунутого на здобуття премії Національної академії наук України імені Л.В. Шубникова**

Сучасна технологія все частіше використовує магнітні матеріали для створення активних елементів енергоефективних систем збору та обробки інформації, сенсорів електромагнітних полів, механічних датчиків та мікроактуаторів. Це відкриває можливість розробки пристроїв, які можуть працювати без зовнішніх джерел живлення або з мінімальними енергозатратами. Наприклад, для обробки сигналів людського мозку можна використовувати датчики, які працюють за рахунок руху голови. Пасивні датчики авіаційної та космічної техніки працюють за рахунок вібрації. Датчики в автомобілях та кораблях, акустичні датчики будівель та мостів будуть працювати за рахунок акустичних вібрацій. Наномагнітна пам'ять та логічні елементи на основі спінових вентилів і магнітних тунельних затворів дозволяють здійснювати енергоефективне зчитування інформації. При субмікронних (нанометрових) розмірах можна очікувати виникнення нових фізичних ефектів, що можуть радикально змінити властивості матеріалу. Розуміння цих ефектів зробить можливим проектування і розробку нових матеріалів із цікавими макроскопічними характеристиками, при повному контролі за їхніми електричними, оптичними, магнітними та іншими фізичними властивостями, необхідними для швидкодіючих обчислювальних приладів.

Синтез та дослідження фізичних властивостей магнітоактивних еластомірів (МАЕ), магнітних мікро- чи наночастинок в еластичній матриці, викликають великий інтерес з боку дослідників і технологів-виробників з огляду на високий конкурентний потенціал в порівнянні з традиційними матеріалами для застосувань в робототехніці, біомедицині, для створення сенсорів. Вони відносяться до так званих «розумних» матеріалів (smart materials), фізичні властивості яких суттєво змінюються під впливом зовнішніх магнітних полів. В магнітоактивних еластомерах густина енергії магнітної підсистеми може бути співмірною з її пружними енергетичними характеристиками. Тому в них спостерігається аномально великий магніто-реологічний ефект, який супроводжується зміною внутрішньої структури композиту в розташуванні частинок в матриці під дією зовнішнього

магнітного поля. Пружні модулі магнітоактивних еластомерів в магнітному полі можуть змінюватися в сотні разів, для них характерний ефект пам'яті форми, вони мають легку податливість до дії слабких зовнішніх збурень, тому дуже цікаві для “soft robotic”. Реструктуризація магнітоактивних еластомерів у високоеластичній матриці і її вплив на магнітореалогічний ефект є нетривіальною фізичною проблемою, яка стимулює експериментальні і теоретичні дослідження.

Даний цикл присвячений розробці фізичних основ створення матеріалів, в яких керування структурними, механічними, термодинамічними та магнітними властивостями можна здійснювати за допомогою магнітного поля, а також матеріалів з суттєвою зміною магнітних параметрів внаслідок модифікації їх структурних та механічних властивостей. В ньому представлено експериментальні дослідження різних типів магнітних багатофункціональних матеріалів: багатошарових наноструктур з температурно залежною міжшаровою обмінною взаємодією, плівкові структури феромагнітних сплавів з ефектом пам'яті форми, магнітних еластомерів, тощо. Основна увага приділялася дослідженню характеру взаємодії між елементами таких структур та впливу цих взаємодій на магнітостатичні, магнітодинамічні та магнітомеханічні властивості.

Цей цикл робіт є результатом багаторічних досліджень, виконаних авторами в Інституті магнетизму НАН України та МОН України в колаборації з провідними фізичними лабораторіями світу. До циклу робіт, що подаються на здобуття Премії НАН України ім. Л.В. Шубникова, включені лише роботи виконані за останні 5 років та надруковані у відомих міжнародних виданнях, таких як Scientific Reports, Physical Review B, Applied Physics Letters, Journal of Alloys and Compounds, Smart materials and Structures, Soft Matter та інших. Роботи оформлені у вигляді 21 журнальної публікації.

### **Основні пріоритетні результати авторського колективу**

Запропоновано та створено магнітну багатошарову структуру, в якій реалізовано новий тип міжшарової обмінної взаємодії, а саме температурно-залежна обмінна взаємодія між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабоферомагнітного сплаву. На основі проведених досліджень створено модифікований спіновий вентиль з прошарком розбавленого феромагнітного сплаву - термомагнітний Кюрі-перемикач.

Встановлено визначальну роль ефекту підмагнічування (*proximity effect*) в обмінній взаємодії між шарами сильних феромагнетиків через прошарок розбавленого слабого феромагнітного сплаву, який приводить до

неоднорідного розподілу намагніченості в прошарку розбавленого феромагнітного сплаву та обумовлює сильну нелінійну залежність міжшарового обміну від товщини прошарку і концентрації магнітної компоненти в ньому. З метою послаблення ефекту підмагнічування на інтерфейсі між сильним і слабким феромагнетиками та покращення чіткості термомагнітного перемикаччя в Кюрі-перемикачі синтезовано прошарок розбавленого феромагнітного сплаву з градієнтним розподілом концентрації магнітної компоненти по товщині прошарку. Виявлено кероване температурою анізотропне згасання магнітних динамічних процесів в термомагнітному перемикачі.

Запроновано та створено температурно чутливий магнітний тунельний контакт, як прототип елемента магнітної пам'яті, з термомагнітним перемикаччяма магнітних і резистивних станів. Проведені експериментальні дослідження впливу неоднорідних полів розмагнічування на магнітодинамічні властивості наноелементів.

Досліджено зв'язок між нанодвійниковою структурою та магнітними властивостями в Гейслерівських сплавах з ефектом пам'яті форми. Показано, що обмінний зв'язок між субмікронними двійниковими компонентами призводить до модифікації ефективної магнітної анізотропії аналогічно тому, що спостерігається в магнітних багат шарових системах. Показано, що нанодвійникування суттєво впливає на значення ефективної магнітної анізотропії другого порядку і практично не впливає на значення константи анізотропії четвертого порядку. Показано, що на відміну від масивних матеріалів, в плівках з магнітним ефектом пам'яті форми може спостерігатись досить значна зміна об'єму при мартенситному перетворенні (як позитивна, так і негативна). Це призводить до значної відмінності між значеннями констант магнітної анізотропії четвертого порядку в плівках та масивних монокристалах. Продемонстровано, що параметри кристалічної ґратки тонких плівок в мартенситній фазі настільки сильно залежать від умов отримання плівок, що для плівок одного складу на однакових підкладках в залежності від умов їх отримання, константа анізотропії четвертого порядку може відрізнитися не тільки за величиною, але і за знаком.

Показано, що в плівках Гейслерівських сплавів величина обмінної взаємодії всередині двійникових варіантів та на їх границях в може суттєво відрізнитись. Зокрема, в епітакіальних плівках  $\text{NiMnSnCo/MgO}(001)$  може змінюватись навіть знак взаємодії: феромагнітна всередині варіантів і антиферомагнітна на границях. Таким чином, мартенсит з субмікронними двійниками є прямим аналогом штучних антиферомагнетиків.

Показано, що нанодвійникування може призводити до формування неколінеарної магнітної структури, якщо розміри двійників співрозмірні з довжиною обмінної кореляції. Розсіяння електронів на такій структурі обумовлює появу значного від'ємного магнітоопору в широкому діапазоні температур.

Проведено теоретичний опис індукованого магнітним полем повороту, розташованої в еластомері магніто-м'якої феромагнітної сферичної частинки з одноосьовою магнітною анізотропією. Індукований магнітним полем поворот частинок в еластомері має магніто-пружну природу і супроводжується критичною зміною намагніченості багатодоменного стану частинок, як при магнітному фазовому переході другого роду.

Було розглянуто новий фізичний механізм аномально великої деформації вигину, індукованої магнітним полем в системі феромагнітних смуг, що розташовані на поверхні еластомеру. Показано, що польова поведінка вигину в такій системі має критичну поведінку з сильно нелінійним характером. Розроблена теорія даного явища та встановлена залежність критичних полів в цьому процесі від геометричних факторів та фізичних властивостей елементів системи.

Теоретичними методами доведено, що у неструктурованих магнітоактивних еластомерах аномальний магнітореологічний ефект - зростання майже на два порядки величини ефективного модуля зсуву в зовнішньому магнітному полі - є наслідком одновісної магнітної анізотропії, індукованої магнітним полем. Додатковий магнітопружний внесок до механічної напруги, створюваний за рахунок впливу наведеної магнітної анізотропії збільшує величину ефективного модуля зсуву магнітоактивного еластомеру при його намагнічуванні. Числові оцінки величини магнітореологічного ефекту гарно узгоджуються з відомими експериментальними даними. Таким чином, в роботі визначено тип структур, пружні властивості яких можуть бути ефективно керованими зовнішнім магнітним полем.

Експериментальним шляхом досліджено поведінку магнітоактивного еластомеру при згинанні під дією однорідного стаціонарного магнітного поля. Показано, що магніто-польовій залежності вигину стрижня МАЕ притаманний гістерезис, який обумовлений магнітореологічним ефектом, внаслідок реструктуризації положень частинок у МАЕ при вигині. Величина вигину критично залежить від магнітного поля, напрямком якого є директором для вигину, що зберігає виродження для знаку вигину.

Синтезовано феромагнітний нанопорошок із суперпарамагнітними наночастинками нестехіометричного манганіту  $\text{La}_{0.8}\text{Ag}_{0.2}\text{Mn}_{1.2}\text{O}_3$  з точкою Кюрі в околі кімнатних температур ( $T_c = 308 \text{ K}$ ). На його основі був виготовлений магнітоактивний еластомер (MAE). Вивчено магнітні та магнітопружні властивості MAE поблизу точки Кюрі. Показано, що основним фактором, який впливає на вигин, є індукована магнітним полем реструктуризація MAE. Встановлено, що магнітопружні властивості MAE мають критичні особливості в околі температури Кюрі. Показано, що MAE з температурою Кюрі, трохи більшою за кімнатну температуру, можуть бути використані як розумні матеріали для пристроїв із контрольованими температурою магнітопружними властивостями. При підвищенні температури вище точки Кюрі магнітопружні властивості MAE зникають, а при зниженні температури відновлюються. Результатом даної роботи є розробка нового типу магнітоактивного еластомеру з додатковими температурними засобами впливу. Автори роботи мають пріоритет у цьому напрямку.

### **Перспективи застосування досліджень**

Представлені в циклі робіт експериментальні результати важливі як для фундаментальної фізики магнетизму, зокрема для таких нових напрямків матеріалознавства, як матеріали спінтроники, магнітофотоники та магнітоніки так і для практичних застосувань у сучасних пристроях запису і зчитування інформації. Магнітоактивні еластомери можуть бути використані як функціональні матеріали для розробки та створення нових типів мікроактуаторів та інших елементів робототехніки.