

А.О. СНАРСЬКИЙ^{1,2}

¹ Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
(Просп. Перемоги, 37, Київ 03056)

² Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
(вул. Миколи Шпака, 2, Київ 03113; e-mail: asnarskii@gmail.com)

ЕФЕКТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ МАКРОСКОПІЧНО НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ РЕСТРУКТУРИЗАЦІЄЮ

УДК 539

У невеликому огляді розглянуто проблеми опису кінетичних явищ у макроскопічно випадково неупорядкованих середовищах. Завдання, якими займався П.М. Томчук. Частину раніше одержаних результатів було описано в огляді П.М. Томчука в Українському фізичному журналі. Описано сучасний стан теорії, створеної для дослідження нового типу матеріалів із змінною структурою. Одним із таких матеріалів є магнітоеластомери, що мають різноманітні застосування в техніці та медицині. Описано використання введеного поняття рухомого порогу протікання для опису магнітних та пружних властивостей магнітоеластомерів.

Ключові слова: пружні властивості, наближення ефективного середовища, самоузгоджене випадкове гетерогенне середовище, двофазний композитний матеріал, поріг перколяції.

1. Методи опису

Під макроскопічно неоднорідними середовищами розуміють такі середовища, характерний розмір неоднорідності яких набагато більший за будь-які характерні мікроскопічні розміри. Наприклад, якщо йдеться про протікання струму, розмір неоднорідності повинен бути набагато більшим за характерні довжини вільного пробігу носіїв заряду. Зокрема, це означає, що таке макроскопічно неоднорідне середовище можна характеризувати локальним законом Ома, що пов'язує густину електричного струму з напруженістю електричного поля в кожній точці середовища.

Макроскопічна неоднорідність, наприклад, провідність може бути неперервною, тоді питома провідність $\sigma(\mathbf{r})$ є неперервною функцією координат, і дискретною. В останньому випадку говорять про

дво-, три- і т.д. фазні середовища, де під фазою розуміють сукупність ділянок одного сорту з цим значенням питомої провідності.

Основною характеристикою процесів перенесення в макроскопічно неоднорідних середовищах є ефективні кінетичні коефіцієнти, які характеризують середовище в цілому – на розмірах набагато більше характерних розмірів макроскопічних неоднорідностей. Задавати локальні властивості середовища для обчислення ефективних кінетичних коефіцієнтів можна двома різними способами: або вважати відомою залежність локальних кінетичних коефіцієнтів від координат – детерміністичний підхід, або задавати локальні кінетичні коефіцієнти як випадкові поля – статистичний підхід. Кожен із цих підходів має свої переваги та недоліки. Детерміністичний підхід дає змогу досліджувати, як правило, середовища з найбільш простою структурою, труднощі статистичного підходу пов'язані зі складністю зіставлення середовищ, що вивчаються, і відповідних їм випадкових полів локальних кінетичних коефіцієнтів. Строгий теоретичний підхід до обчислення ефективних кінетичних коефіцієнтів випадково неоднорідних середовищ вимагає розділення задачі на два етапи: об-

Цитування: Снарський А.О. Ефективні властивості макроскопічно неоднорідних середовищ із реструктуризацією. *Укр. фіз. журн.* **70**, № 10, 705 (2025).

© Видавець ВД “Академперіодика” НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

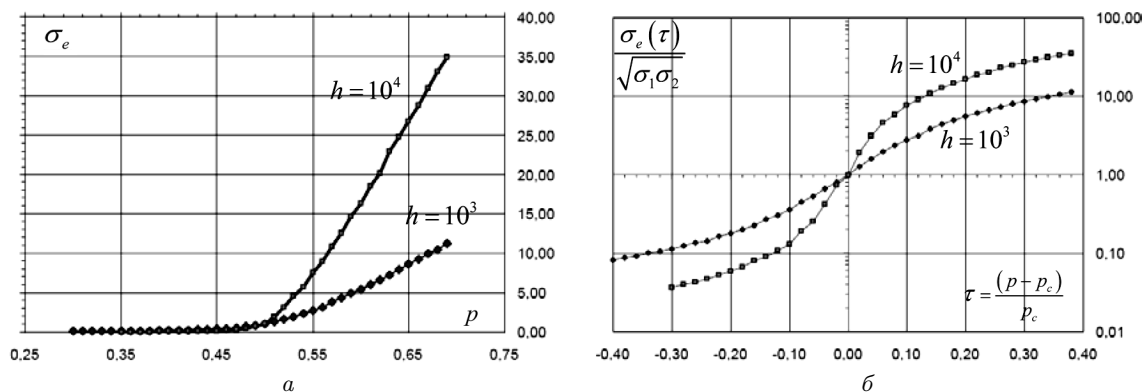


Рис. 1. Криві, що характеризують критичну поведінку ефективної провідності двовимірної ґратки опорів за різних значеннях щодо провідностей фаз $h = s_2/s_1$: а – в осях $\sigma_e - p$, б – в осях $\sigma_e - \tau$

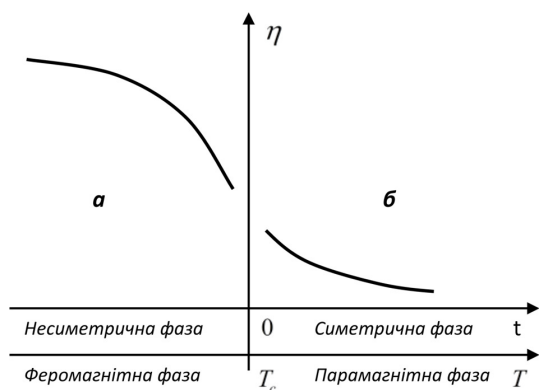


Рис. 2. Залежність параметра порядку від температури $t = T - T_c$, T_c – критична температура

числення ефективних кінетичних коефіцієнтів за фіксованої залежності локальних кінетичних коефіцієнтів від координат та подальше усереднення з різних реалізацій [1–5].

Досить несподіваним фактом є те, що існують задачі визначення ефективних властивостей у середовищах не з макро, а з мікроскопічною неоднорідністю, які зводяться до вищезазначених макроскопічних задач. Такою задачею, наприклад, є задача про високотемпературну стрибкову провідність у легованих напівпровідниках.

Вперше задача обчислення ефективних кінетичних коефіцієнтів (ЕКК) була сформульована ще Максвеллом, і розвинена Клаузіусом, Мосоті, Лоренцем, Гарнеттом [6]. Отримані наближення добре працюють лише за малої концентрації включень. Проте вони використовувалися і використовуються у величезній кількості застосу-

вань для опису властивостей найрізноманітніших композитів.

У 30–40 роки для обчислення ЕКК було використано метод теорії середнього поля (самоузгодження) – наближення Бруггемана [7] (і незалежно від нього, але пізніше) наближення Ландауера [8]. Часто це наближення називають ЕМА (effective medium approximation). Наближення ЕМА застосовано для дослідження різних фізичних властивостей: для провідності (власне у Бруггемана та Ландауера), для еластичних модулів (Будянский) [9, 10].

У випадку двофазних сильно неоднорідних середовищ збільшення концентрації добре провідної компоненти (фази) і досягнення певного значення концентрації приводить до різкого зростання ефективної провідності (див. рис. 1 з книги [5])

Якісне пояснення різкого зростання – виникає безперервний шлях (нескінченний кластер) по фазі, що добре проводить [2–5]. Таке значення концентрації було названо порогом протікання, а саме явище перколяцією. Після того, як Бродбентом і Хаммерслі було введено поріг протікання й виявлено, що різні геометричні та фізичні характеристики перколяційних систем залежать від близькості до порога протікання, і ця залежність має ступеневий вигляд, а критичні індекси, що її описують, є універсальними, не могла не виникнути ідея, що перколяція – це аналог фазового переходу 2-го роду. Це означає, що поблизу порога протікання ефективну провідність можна розуміти (і описувати в термінах) як параметр порядку фазових переходів другого роду (див. рис. 2 з книги [5]).

Перколяційний підхід (і побудова ієрархічної моделі перколяційної структури [5]) дав змогу на-

очно описати широкий клас задач, термо- і гальваноманітні явища, фліккер-шум, пінінг вихорів Абрикосова, локалізацію Андерсона в перколяційній структурі, високотемпературну стрибкову провідність.

Нещодавно з'явився новий клас макроскопічно неоднорідних середовищ, для опису яких довелося модифікувати наведені вище підходи.

2. Магнітоактивний еластомер

На початку дві тисячі десятих років було створено магнітоактивний еластомер (МАЕ), що складається з двох фаз: 1 фаза – карбонильне залізо (кульки розміром кілька мікрон, без власного магнітного моменту) і 2 фаза – полідиметилсилоксан (м'яка, високоеластична матриця) [11, 12]. Окремо фази реагували на магнітне поле простим очевидним чином. У металевих кульках виникав магнітний момент, матриця фактично не реагувала на магнітне поле. Цілковито несподівано поєднання таких фаз виявило в магнітному полі ряд незвичайних – екстраординарних властивостей. Наприклад, ефективне значення модуля зсуву композиту за ввімкнення порівняно невеликого магнітного поля порядку 0,6 Тесла зростало більш ніж у 1000 разів. Іншими словами, м'яка гумка перетворювалася на шматок твердої пластини. Ще одна несподівана властивість – залежність ефективної діелектричної проникності МАЕ від магнітного поля (попри те, що матеріали обох фаз ніяк не змінюють своїх діелектричних властивостей у магнітному полі).

Протягом наступних років з'явилася велика кількість теоретичних робіт, присвячених спробі побудувати теоретичну модель, що описує набір виявлених ефектів. Моделі першого типу [13] пов'язували поведінку МАЕ магнітне поле із взаємодією наведених магнітних моментів на включеннях (кульки карбонильного заліза). Пружна напруга, що з'являється завдяки взаємодії магнітних моментів змінювало пружний стан зразка в цілому і тим самим змінювало ефективні пружні властивості (зокрема і модуль зсуву) матеріалу. Попри те, що така взаємодія існує та впливає на ефективні властивості, така модель явно недостатня для опису МАЕ. По-перше, як показали розрахунки не вдається отримати значного зростання пружних модулів. По-друге, і це важливіше, запропонований механізм не призводить до зміни ді-

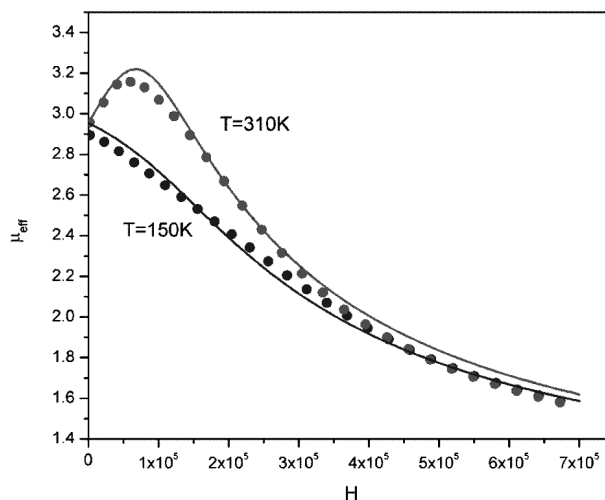


Рис. 3. Залежність ефективної магнітної проникності від магнітного поля А/м [20]

електричної проникності в магнітному полі. Другий тип моделей – поворот (обертання) включення так, щоб наведений магнітний момент, спрямований уздовж легкої осі намагнічування частинки був спрямований якомога ближче до напрямку зовнішнього магнітного поля [14]. Такий поворот “закручує” матрицю, створюючи в ній напруги та деформації і, як було показано, призводить до збільшення ефективних пружних модулів. Використовуючи метод апроксиманта Паде, вдалося показати, що можливе велике збільшення значень модуля зсуву [15]. Однак, як і в моделях першого типу, і тут є зазначені недоліки.

У роботах [16–18] були проведені вимірювання ефективної магнітної проникності за різних температур і експериментально показано, що властивості, наприклад, ефективної магнітної проникності за азотної температури (коли рух включень неможливий) поведуться згідно зі стандартною теорією середнього поля, а за кімнатної температури з'являються особливості (див. рис. 3 [19]). У роботах [20, 21] вимірювання такого типу були повторені та підтвердили результати [16–18].

Під час введення зразка МАЕ у магнітне поле частинки зсуваються, змінюють своє положення. Надалі [22, 23], за допомогою мікрохвильового обстеження зразків було безпосередньо показано зміщення включень в магнітному полі.

Зокрема, це зміщення означає, що теоретичний опис ефективних властивостей МАЕ відомими те-

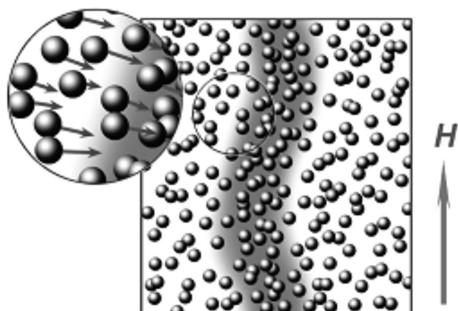


Рис. 4. Схема збільшення щільності передперколяційного кластера в магнітному полі

оріями (теорія середнього поля, теорія перколяції та інші), в яких структура композиту під час накладання зовнішнього поля не змінюється, неможливий. І потрібна принципова зміна теоретичного методу аналізу.

У роботах [24] для аналізу експериментальних даних було запропоновано використовувати теорію протікання, в рамках якої задається залежність порога протікання від магнітного поля. Такий підхід містить принципово нове положення, проте для опису МАЕ є досить приблизним (підгоночним), оскільки перколяційні залежності ефективних коефіцієнтів застосовні (працюють) тільки в дуже вузькому діапазоні та за великого відношення магнітних проникностей (або провідностей, діелектричних проникностей тощо).

Для побудови моделі, що враховує реструктуризацію (зміщення частинок включень першої фази під час увімкнення зовнішнього магнітного поля) необхідно визначити під дією яких сил це відбувається.

В експериментах з МАЕ концентрація включень велика, близька до порога протікання, але менша за нього, і необхідно врахувати, що в середовищі вже сформована “передперколяційна” структура. Існують так звані “траткові звірі” – кластери кінцевого розміру, які складаються з частинок включень, деякі з яких у випадку подальшого збільшення концентрацій утворюють структуру (сітку) нескінченного кластера [4]. Відповідно внутрішнє магнітне поле всередині зразка вже не можна вважати однорідним, його величина збільшуватиметься в областях кластерів і зменшуватиметься у проміжках. Водночас на магнітний момент частинок включень діятиме сила Кельвіна пропорційна градієнту квадрата магнітного поля. Частинки бу-

дуть притягуватися до кінцевих кластерів, збільшуючи їх щільність (локальну концентрацію) – див. рис. 4.

Головна ідея теоретичного опису ефективних властивостей у разі руху частинок включень полягає в тому, що зростання їхньої концентрації в передперколяційних кластерах можна трактувати як зменшення порога протікання. Тобто, різниця між порогом протікання та концентрацією $p_c - p$ зменшується не за рахунок збільшення p , а за рахунок зменшення p_c . Такий підхід передбачає, що поріг протікання вже не є константою, а є функцією магнітного поля, яка зменшується зі зростанням магнітного поля.

Для кількісного опису ефективних властивостей таких середовищ (поза вузькою критичною областю концентрацій теорії перколяції) можна скористатися модифікацією ЕМА. У стандартній ЕМА, наприклад, для опису концентраційної поведінки ефективної діелектричної проникності, поріг протікання заданий самим рівнянням (і для тривимірного випадку дорівнює $1/3$)

$$\frac{\varepsilon^e - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^e} p + \frac{\varepsilon^e - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon^e} (1 - p) = 0. \quad (1)$$

У роботі [26] для опису ефективних гальваноманітних властивостей композитів було запропоновано модифікацію ЕМА, в якій поріг можна було задавати будь-яким

$$\frac{\frac{\varepsilon^e - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon^e}}{1 + c(p, p_c)} p + \frac{\frac{\varepsilon^e - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon^e}}{1 + c(p, p_c)} (1 - p) = 0, \quad (2)$$

де терм $c(p, p_c)$

$$c(p, p_c) = (1 - 3p_c) \left(\frac{p}{p_c}\right)^{p_c} \left(\frac{1 - p}{1 - p_c}\right)^{1 - p_c} \quad (3)$$

і p_c – значення порога протікання, що задається.

Тепер, в описах ефективних властивостей МАЕ – цей поріг перебігу залежить від зовнішнього магнітного поля. Ця залежність була взята у вигляді, запропонованому в [24]

$$p_c(|\langle \mathbf{H} \rangle|) = p_c(0) e^{-\frac{(|\langle \mathbf{H} \rangle|)}{H_c}}, \quad (4)$$

де H_c – характерне поле, яке нормує, і яке прийнято називати критичним.

Завдяки такому підходу вдалося описати залежність ефективної магнітної проникності від магнітного поля, де довелося врахувати так само і нелінійність залежності магнітної проникності включень від магнітного поля, пов'язану з нелінійністю кривої намагнічування (дивись суцільну лінію та її порівняння з експериментальними даними на рис. 3 [2]).

Рівняння теорії середнього поля для діелектричної проникності були записані з урахуванням анізотропії [27] і знайдена залежність від магнітного поля проникності магнітного поля (див. рис. 5).

Аналогічний підхід, підхід рухомого порогу протікання, був використаний і для опису пружних властивостей МАЕ. Теорія середнього поля для двофазного випадково неоднорідного середовища (наближення Будянського) [28] має вигляд

$$\begin{cases} \Omega_1 p + \Omega_2 (1 - p) = 0, \\ \Theta_1 p + \Theta_2 (1 - p) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \Omega_i &= \frac{\frac{G_i}{G_e} \frac{1+\nu_i}{1+\nu_e} \frac{1-2\nu_e}{1-2\nu_i} - 1}{1 + \alpha_e \left(\frac{G_i}{G_e} \frac{1+\nu_i}{1+\nu_e} \frac{1-2\nu_e}{1-2\nu_i} - 1 \right)}, \\ \Theta_i &= \frac{\frac{G_i}{G_e} - 1}{1 + \beta_e \left(\frac{G_i}{G_e} - 1 \right)}, \\ \alpha_e &= \frac{1}{3} \frac{1 + \nu_e}{1 - \nu_e}, \quad \beta_e = \frac{2}{15} \frac{4 - 5\nu_e}{1 - \nu_e}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $i = 1, 2$, G_i – модулі зсуву фаз, та аналогічно ν_i – Модулі Пуассона.

Як і наближення Бруггемана–Ландауера, наближення Будянського необхідно модифікувати, ввівши рухомий поріг протікання, для чого було необхідно змінити терм (3). В цілому ЕМА наближення для пружної задачі рухомого порогу протікання було введено в [29, 30] так

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Omega_1}{1 + s(p, \tilde{p}_c)\Omega_1} p + \frac{\Omega_2}{1 + s(p, \tilde{p}_c)\Omega_2} (1 - p) &= 0 \\ \frac{\Theta_1}{1 + s(p, \tilde{p}_c)\Theta_1} p + \frac{\Theta_2}{1 + s(p, \tilde{p}_c)\Theta_2} (1 - p) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де

$$s(p, \tilde{p}_c) = (1 - 2\tilde{p}_c) \left(\frac{p}{\tilde{p}_c} \right)^{\tilde{p}_c} \left(\frac{1 - p}{1 - \tilde{p}_c} \right)^{1 - \tilde{p}_c}. \quad (8)$$

Отримані залежності модуля зсуву від магнітного поля показують знайдене експериментально гігантське зростання (див. рис. 6).

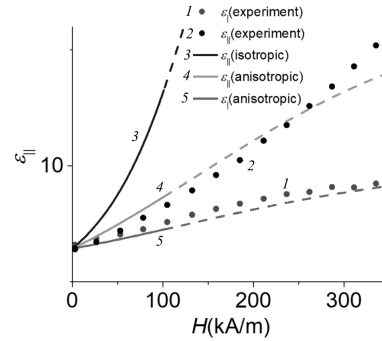


Рис. 5. Залежність компонентів тензора ефективної діелектричної проникності від магнітного поля

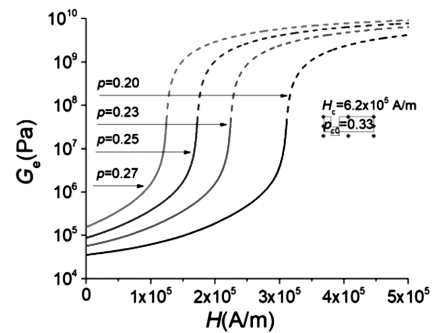


Рис. 6. Залежність ефективного модуля пружності зовнішнього магнітного поля

Запропонована модель, звичайно, є наближенням, що не враховує ряд явищ, наприклад, появу анізотропії у розташуванні включень (так звана геометрична анізотропія).

3. Висновок

Очевидно, що МАЕ, композит із взаємодією як через “магнітні”, так і через пружні сили, з побудовою структури, навряд чи може бути описаний однією простою моделлю для різних явищ – пружності, магнітної проникності, діелектричних властивостей тощо. За різних значень поля, концентрації та температури різні механізми (дипольна взаємодія між частинками, поворот частинки у зовнішньому магнітному полі, зсув частинок завдяки неоднорідності локального поля тощо) можуть відігравати різну роль. Можливі і складніші механізми, наприклад дипольна взаємодія конгломератів з кількох частинок, їх поворот і зсув. На даний момент можна тільки стверджувати, що згідно з наведеними вище дослідженнями, основний

механізм, що пояснює явища єдиним чином (якісно, а іноді і кількісно) – це зміщення частинок включень під дією внутрішніх неоднорідних магнітних полів і яке може бути описане як наближення до порогу протікання (зсув порога протікання).

У запропонованій моделі рухомого порогу протікання була введена залежність порогу протікання від зовнішнього магнітного поля з характерною константою, критичним полем H_c . Це, звичайно, константа, що вибирається для узгодження з експериментальними даними. Підтвердженням логічності і несуперечності теорії рухомого порогу протікання є те, що величина цієї константи, що вибирається, наприклад, для опису ефективних властивостей магнітної проникності, залишається практично такою ж для інших фізичних явищ, наприклад, для пружних властивостей.

Перелічимо коротко низку проблем і задач, які можна досліджувати і вирішувати, використовуючи поняття рухомого порога протікання:

- врахування анізотропії структури включень у задачах пружності;
- дослідження взаємодії між включеннями поблизу передперколяційних структур, для обчислення значення критичного поля та його залежності від параметрів середовища;
- побудова моделі стрикції зразка МАЕ кінцевого розміру;
- дослідження тимчасових процесів у МАЕ, визначення часу релаксації та уявних частин пружних модулів.

Значною мірою розглянутого тут групою дослідників, до якої входив автор, розвитку теорії макроскопічно неоднорідних середовищ було досягнуто завдяки П.М. Томчуку, участі в семінарі під його керівництвом та постійному особистому спілкуванню. Автор вдячний Б.І. Леву, М. Шамонину, В.М. Калиті та І.В. Безсуднову за численні плідні обговорення порушених проблем та зауваження.

1. А.О. Снарський, П.М. Томчук, Кінетичні явища в макроскопічно неоднорідних анізотропних середовищах. *УФЖ* 32 (1), 66 (1987).
2. S. Torquato. *Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties* (Springer, 2002).
3. G.W. Milton. *The Theory of Composites* (Cambridge University Press, 2002).

4. D. Stauffer, A. Aharony. *Introduction to Percolation Theory* (Taylor & Francis, 2018).
5. A. Snarskii, I.V. Bezsudnov, V.A. Sevryukov, A. Morozovskiy, J. Malinsky. *Transport Processes in Macroscopically Disordered Media. From Mean Field Theory to Percolation* (Springer, 2016).
6. T.C. Choy. *Effective Medium Theory: Principles and Applications* (Oxford University Press, 2016).
7. V.D. Bruggeman. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Ann. Phys.* **416**, 636 (1935).
8. R. Landauer. The electrical resistance of binary metallic mixtures. *J. Appl. Phys.* **23**, 779 (1952).
9. B. Budiansky. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *J. Mech. Phys. Solids* **13**, 223 (1965).
10. S.K. Kanaun, V. Levin. *Self-Consistent Methods for Composites: Vol. 1: Static Problems* (Springer Science & Business Media, 2008).
11. A. Stoll, M. Mayer, G.J. Monkman, M. Shamonin. Evaluation of highly compliant magneto-active elastomers with colossal magnetorheological response. *J. Appl. Polymer Sci.* **131** (2), id. app. 39793 (2014).
12. E. Forster, M. Mayer, R. Rabindranath, H. Böse, G. Schlunck, G.J. Monkman, M. Shamonin. Patterning of ultrasoft, agglutinative magnetorheological elastomers. *J. Appl. Polymer Sci.* **128** (4), 2508 (2013).
13. D. Romeis, P. Metsch, M. Kästner, M. Saphiannikova. Theoretical models for magneto-sensitive elastomers: A comparison between continuum and dipole approaches. *Phys. Rev. E* **95** (4), 042501 (2017).
14. V.M. Kalita, A.A. Snarskii, D. Zorinets, M. Shamonin. Single-particle mechanism of magnetostriction in magnetoactive elastomers. *Phys. Rev. E* **93** (6), 062503 (2016).
15. A.A. Snarskii, V.M. Kalita, M. Shamonin. Renormalization of the critical exponent for the shear modulus of magnetoactive elastomers. *Sci. Rep.* **8** (1), 4397 (2018).
16. A.V. Bodnaruk, A. Brunhuber, V.M. Kalita, M.M. Kulyk, A.A. Snarskii, A.F. Lozenko, M. Shamonin. Temperature-dependent magnetic properties of a magnetoactive elastomer: Immobilization of the soft-magnetic filler. *J. Appl. Phys.* **123** (11), 115118 (2018).
17. A.V. Bodnaruk, V.M. Kalita, M.M. Kulyk, A.F. Lozenko, S.M. Ryabchenko, A.A. Snarskii, M. Shamonin. Temperature blocking and magnetization of magnetoactive elastomers. *J. Magnetism and Magnetic Materials* **471**, 464 (2019).
18. A.V. Bodnaruk, A. Brunhuber, V.M. Kalita, M.M. Kulyk, P. Kurzweil, A.A. Snarskii, M. Shamonin. Magnetic anisotropy in magnetoactive elastomers, enabled by matrix elasticity. *Polymer* **162**, 63 (2019).
19. A.A. Snarskii, D. Zorinets, M. Shamonin, V.M. Kalita. Theoretical method for calculation of effective properties of composite materials with reconfigurable microstructure: Electric and magnetic phenomena. *Phys. A: Stat. Mechanics and its Applications* **535**, 122467 (2019).

20. A.T. Clark, D. Marchfield, Z. Cao, T. Dang, N. Tang, D. Gilbert, X.M. Cheng. The effect of polymer stiffness on magnetization reversal of magnetorheological elastomers. *APL Materials* **10** (4), 041106 (2022).
21. K. Jing, H. Li, H. Xiang, X. Peng. A new model to describe the effective magnetic properties of magnetorheological elastomers. *Physics* **7** (2), 21 (2025).
22. M. Schümann, Th. Gundermann, S. Odenbach. Microscopic investigation of the reasons for field-dependent changes in the properties of magnetic hybrid materials using X-ray microtomography. *Archive of Applied Mechanics* **89**, 77 (2019).
23. K. Chen, M. Watanabe, Y. Takeda, T. Maruyama, M. Uesugi, A. Takeuchi, T. Mitsumata. In situ observation of the movement of magnetic particles in polyurethane elastomer densely packed magnetic particles using synchrotron radiation X-ray computed tomography. *Langmuir* **38** (44), 13497 (2022).
24. T. Mitsumata, S. Otori, A. Honda, M. Kawai. Magnetism and viscoelasticity of magnetic elastomers with wide range modulation of dynamic modulus. *Soft Matter* **9** (3), 904 (2013).
25. B.I. Lev. Cellular structure in condensed matter. *Modern Phys. Lett. B* **27** (28), 1330020 (2013).
26. A.K. Sarychev, A.P. Vinogradov. Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. *Phys. Stat. Sol. (b)* **117**, K113 (1983).
27. A.A. Snarskii, M. Shamonin, P. Yuskevich, D.V. Saveliyev, I.A. Belyaeva. Induced anisotropy in composite materials with reconfigurable microstructure: Effective medium model with movable percolation threshold. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **560**, 125170 (2020).
28. B. Budiansky. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *J. Mech. Phys. Solids* **13**, 223 (1965).
29. A.A. Snarskii, M. Shamonin, P. Yuskevich. Effect of magnetic-field-induced restructuring on the elastic properties of magnetoactive elastomers. *J. Magnetism and Magnetic Materials* **517**, 167392 (2021).
30. A.A. Snarskii, M. Shamonin, P. Yuskevich. Effective medium theory for the elastic properties of composite materials with various percolation thresholds. *Materials* **13** (5), 1243 (2020).

Одержано 21.07.25

A.O. Snarskii

EFFECTIVE PROPERTIES
OF MACROSCOPICALLY INHOMOGENEOUS
MEDIA WITH RESTRUCTURING

The problems of describing kinetic phenomena in macroscopically randomly disordered media have been considered. These are the tasks that P.M. Tomchuk dealt with. Some of the previously obtained results were described in a review by P.M. Tomchuk in the Ukrainian Journal of Physics. In this issue, the current state of the theory that describes a new type of material with a variable structure is presented. One group of such materials includes magnetoelastomers, which have various applications in technology and medicine. The application of the concept of a moving percolation threshold, which was introduced to describe the magnetic and elastic properties of magnetoelastomers, is described.

Keywords: elastic properties, effective medium approximation, self-consistent random heterogeneous medium, two-phase composite material, percolation threshold.