

УДК 539.2:678.01:539.2:537.212

В.Л. Демченко, В.І. Штомпель, С.В. Рябов, В.І. Унрод

## ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРІВ ТА ЇХ КОМПЗИТИВ

This paper studies the influence of magnetic field on the structure and properties of polymers and their composites. The analysis of research into the impact of magnetic fields on unfilled polymers and composites on their basis allows separate effects associated with the interaction of the polymer matrix with the magnetic field and the effects due to structuring ferromagnetic fillers. We establish that the structure of polymer composite materials changes under the impact of a magnetic field. It results in an anisotropic distribution of ferromagnetic fillers and changes the magnetic properties of polymers. We show that the magnetic field is an effective way to regulate the structure and properties of polymers and their composites as in the synthesis and in physical and chemical methods to modify them. The mechanism of the magnetic field and its effectiveness depends on material's magnetic properties.

### Вступ

Створення нових полімерних композиційних матеріалів належить до пріоритетних задач фізики конденсованого стану і не тільки базується на підборі складових, а й пов'язане з більш ефективним напрямом – використанням фізичних методів модифікації їх структури в магнітних полях [1]. Останнім часом значна увага вчених приділяється розробленню методів модифікації наповнених полімерних матеріалів зовнішніми фізичними полями, а саме: ультразвуковим, електроіскровим, магнітним, електричним та іншими. Це відкриває принципово нові можливості для створення композитних матеріалів із покращеними характеристиками [2]. Як правило, використання традиційних методів модифікації полімерів наповнювачами різної природи з метою покращення їх властивостей, особливо електропровідності, теплопровідності, магнітних властивостей, передбачає введення в полімерну матрицю значних концентрацій металовмісного наповнювача, що супроводжується погіршенням механічних властивостей і збільшенням маси полімеру. Використання магнітного поля дає можливість отримувати полімерні матеріали з покращеними фізико-хімічними та механічними властивостями при незначному вмісті наповнювача за рахунок орієнтації полімерних ланцюгів і частинок наповнювача [3].

### Постановка задачі

Метою статті є аналіз літературних джерел з вивчення впливу магнітного поля на структуру та властивості полімерних композитних матеріалів.

### Обговорення результатів досліджень з вивчення впливу магнітного поля на структуру і властивості полімерів та їх композитів

Згідно із сучасними уявленнями, магнітні властивості речовини обумовлюються такими рухами заряджених частинок в атомах: орбітальним рухом електронів навколо ядер; спіном електронів, тобто обертанням електронів навколо власної осі; спіном ядер, який зумовлений існуванням спінів у протонів і нейтронів [4].

При внесенні *діамагнетика* в зовнішнє постійне магнітне поле (ЗПМП) виникають мікроскопічні індукційні струми і, відповідно, додаткові магнітні моменти частинок речовини, спрямовані проти зовнішнього магнітного поля. При внесенні *парамагнетика* в зовнішнє магнітне поле відбувається переважна орієнтація власних магнітних моментів атомів у напрямку силових ліній магнітного поля таким чином, що парамагнетик намагнічується. Намагнічення *феромагнетиків* у ЗПМП спричиняється переорієнтацією векторів намагнічення доменів у напрямку прикладеного поля, яке включає зміщення, обертання і парaproцес [5].

Вплив постійних магнітних полів на властивості полімерів пояснюється орієнтацією фрагментів макромолекул із високими значеннями анізотропії *магнітної сприйнятливості* [6] – величини, яка характеризує здатність речовини намагнічуватись у зовнішньому магнітному полі.

У наш час дослідженням впливу магнітного поля на структуру і властивості полімерних матеріалів займаються групи дослідників в Україні, Росії, Японії, США [1, 2].

Експериментально встановлено, що вплив магнітного поля в процесі формування полімерних матеріалів може застосовуватися:

- у процесі синтезу полімерів [7];
- при затвердінні епоксидних смол [8];
- у процесі переробки полімерів і при формуванні полімерних виробів [9];
- при отриманні полімерних композитів, які містять дрібнодисперсні і волокнисті наповнювачі [9].

При цьому вимоги до полімерної матриці і властивостей наповнювача для ефективного впливу магнітного поля на структуру та властивості полімерних композитів були сформульовані в праці [10]:

- полімер повинен мати низьку в'язкість;
- полімер має бути здатним до затвердіння;
- наповнювач повинен мати феромагнітні властивості.

Із літературних джерел відомо, що для полімерних композитів з дисперсними феромагнітними наповнювачами, сформованих під дією ЗПМП, спостерігаються сильніші ефекти, ніж у сформованих у ЗПМП композитів з діаманітним типом наповнювача. В праці [11] досліджувались композити на основі поліетилену високої густини (ПЕВГ), наповнені феромагнітними наповнювачами, зокрема  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{NiO}$ ;  $\text{MnO}_2$ ;  $\text{NiZnO}_2$ , які були піддані дії ЗПМП ( $H = 1,9 \cdot 10^5$  А/м) протягом 0,5 год. Було показано, що обробка композитних матеріалів у ЗПМП приводить до збільшення діелектричної проникності композитів, що, на думку авторів, пов'язано з поляризацією магнітної частинки, в результаті чого відбувається зміна структури та властивостей композитів.

На характер розподілу феромагнітних наповнювачів впливають переважно напрямки і напруженість магнітного поля [2].

В однорідному магнітному полі на феромагнітну частинку еліпсоїдної форми діє пара сил, які повертають її в сторону зменшення кута між напрямком поля і великою віссю частинки. Обертальним момент визначається співвідношенням

$$L = MH \sin \alpha ,$$

де  $M$  – магнітний момент частинки;  $H$  – напруженість зовнішнього магнітного поля;  $\alpha$  – кут між напрямком  $H$  і великою віссю частинки.

Частинка повернеться в напрямку поля, якщо величина  $L$  буде більшою за момент сил опору полімерної матриці:

$$MH \sin \alpha > PV\tau ,$$

де  $P$  – фактор форми;  $V$  – об'єм частинки;  $\tau$  – напруження зсуву.

З урахуванням магнітного поля оточуючих частинок  $H_0$  вираз для обертального моменту можна записати так:

$$L = MH_0 \sin \alpha .$$

У випадку полімерних композитів ми маємо справу зі значною кількістю феромагнітних частинок, які взаємодіють між собою. Сумарне поле  $H$  є неоднорідним. Градієнти напруженості поля, які створюються частинками, надають можливість їх поєднання в ланцюжки. Якщо концентрація частинок в об'ємі достатньо велика, то утворюється значна кількість ланцюжків. Ефект утворення ланцюжкової структури феромагнітного наповнювача пов'язаний з магнітною взаємодією частинок у низьков'язкій матриці, відштовхуванням однойменних полюсів, які виникають на кінцях частинок і ланцюжків, що розміщені паралельно один до одного. В однорідному магнітному полі ланцюжки розміщуються рівномірно по об'єму.

Електрофізичні властивості полімерних композитних матеріалів, сформованих у ЗПМП, вивчалися у працях [12, 13]. Для нанокompозитів Fe–полі-*n*-ксилилен у ЗПМП ( $H = 8,8 \cdot 10^5$  А/м) спостерігався значний ефект (36 %) гігантського магнітного опору за кімнатної температури, тоді як для нанокompозитів Ni–полі-*n*-ксилилен цей ефект значно нижчий [12]. Це пояснюється тим, що поверхневі електронні стани на межі полімерна матриця–наночастинка, які виникають за хімічної взаємодії наночастинки з полі-*n*-ксилиленом, сильно впливають на магнітний опір нанокompозитів.

Відомо, що ЗПМП значною мірою впливає на деформаційні властивості полімерів. Автори праці [14] вивчали дію однорідного магнітного поля ( $B = 0-2$  Тл) на механічну поведінку композитів на основі рідкого силіконового каучуку та дисперсних наповнювачів – порошоків магнетиту і металічного заліза. Було показано, що в деяких випадках (для зразків з великим вмістом магнітних частинок за великих значень  $B$ ) магнітне поле практично фіксувало деформацію зразка. Це пояснюється тим, що під дією навантаження зразок, внаслідок малості його початкового модуля зсуву, значно деформується. В деформованому стані для мінімізації загальної енергії в однорідному магніт-

ному полі відбувається структурування частинок магнітного наповнювача, яке супроводжується перерозподілом напружень всередині матеріалу. Оскільки після зняття навантаження зразок продовжує перебувати в магнітному полі, сили взаємодії між магнітними частинками "заморожують" утворену структуру. Також було встановлено, що модуль зсуву полімерного матеріалу за сталої напруженості магнітного поля залежить не тільки від концентрації магнітних частинок, а й від їх розміру. Оскільки наночастинки магнетиту мають менший магнітний момент порівняно з більшими частинками заліза, це приводить до більш слабкої диполь-дипольної взаємодії між ними. Розмір частинок також впливає і на їх зв'язок із полімерною матрицею: дрібніші частинки можуть вільніше переміщуватися без додаткової деформації матриці.

Вплив магнітного поля на пружні характеристики матеріалів вивчався авторами праці [15]. При дослідженні дії однорідного магнітного поля ( $H = (58,1; 106,7; 135,3) \cdot 10^3$  А/м) на пружні і в'язкі властивості магнітоеластиків показано, що найбільшого значення модуль Юнга досягає за напруженості магнітного поля  $H = 135,3 \cdot 10^3$  А/м. Для пояснення експериментальних результатів була запропонована модель, згідно з якою при внесенні зразка в однорідне магнітне поле має місце внутрішнє структурування магнітних частинок. Діючи в магнітному полі сили диполь-дипольної взаємодії примушують частинки зміщуватися від початкового положення, деформуючи високоеластичну полімерну матрицю. Енергія взаємодії двох намагнічених частинок описується за допомогою такого потенціалу взаємодії [16]:

$$U_{1,2} = (\mu_0 / (4\pi r^3))(m_1 m_2 - 3(m_1 r)(m_2 r) / r^2),$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала;  $m_1, m_2$  – магнітні моменти частинок;  $r$  – вектор, який з'єднує центри частинок.

У випадку паралельності магнітних моментів в орієнтувальному зовнішньому магнітному полі мінімум енергії диполь-дипольної взаємодії відповідає орієнтації частинок вздовж однієї лінії. Магнітні частинки, які містяться в магнітоеластичу, притягуючись одна до одної, також прагнуть утворити ланцюги. Однак полімерна матриця перешкоджає їх об'єднанню, і в зразку утворюються витягнуті вздовж силових ліній і стиснуті з усіх боків магнітними силами  $F_M$  циліндричні області стисненого полімеру.

При дослідженні впливу ЗПМП ( $B = 0,2$  Тл) на формування структури композитів на основі полівінілхлориду (ПВХ) і високодисперсних наповнювачів ванадію (V) та  $Fe_3O_4$  було показано [17], що ЗПМП впливає на процеси структуроутворення в гетерогенних полімерних системах, при цьому структурні зміни відбуваються саме в граничних шарах. Це дає можливість спрямовано регулювати їх макровластивості.

Магнітна обробка матеріалів у багатьох випадках дає змогу впорядкувати структуру і значно збільшити міцність матеріалів [18, 19]. В огляді [18] наведено численні дані про зміну релаксаційних, механічних та інших властивостей полімерів після магнітної обробки у в'язкотекучому стані. Дослідження структури полімерів показало, що ЗПМП збільшує ступінь упорядкування молекул, зменшує розміри кристалітів і викликає анізотропію надмолекулярних утворень.

Обробка епоксикомпозитних матеріалів зовнішніми полями в процесі формування покращує їх характеристики внаслідок орієнтації ланцюгів макромолекул [20, 21].

Нами в праці [3] було проведено дослідження основних закономірностей впливу зовнішнього постійного магнітного поля на структуру і властивості полімерних композитів на основі епоксидного полімеру (ЕП) та оксидів металів ( $Al_2O_3$  чи  $Fe_2O_3$ ) або їх сумішей із поліаніліном (ПАН). За результатами досліджень встановлено, що під впливом постійного магнітного поля відбувається зменшення мікрообластей гетерогенності  $l_p$ , які формуються безпосередньо на поверхні частинок наповнювача на початковому етапі затвердіння полімерної матриці, полімерних систем на основі епоксидного полімеру й оксидів металів  $Al_2O_3$  або  $Fe_2O_3$  та частково зростає період ближнього впорядкування фрагментів міжвузлових молекулярних ланок епоксидної смоли ЕД-20. Встановлені структурні перетворення композитів, сформованих під дією постійного магнітного поля, приводять до підвищення їх термостійкості, тепло- і електропровідності. Показано, що внаслідок орієнтаційної дії постійного магнітного поля електропровідність композитів із сумішами ПАН і одного з оксидів металів зростає на 2–4 порядки.

У праці [22] вивчали вплив однорідного ЗПМП ( $H = 4 \cdot 10^5$  А/м) на орієнтацію молекул епоксидних олігомерів (ЕО). Була запропонована модель, згідно з якою молекули епоксид-

них олігомерів – лінійні з малим коефіцієнтом полімеризації (зазвичай  $n = 0-2$ ), тому можна уявити їх у вигляді жорстких анізодіаметричних частинок, які в однорідному ЗПМП орієнтуються під дією результуючого обертального моменту:

$$M = M_1 + M_2,$$

$$M_1 = \frac{\Delta\chi}{2\mu_0} B^2 V \sin \varphi,$$

де  $M_1$  – величина моменту, який визначається наявністю структурної анізотропії магнітної сприйнятливості молекули ЕО  $\Delta\chi$ ;  $B$  – індукція магнітного поля;  $\mu_0$  – магнітна стала;  $V$  – об'єм частинки;  $\varphi$  – кут між вектором  $B$  і напрямком із найбільшою магнітною сприйнятливістю;

$$M_2 = \frac{\chi^2(1-3Q)}{4\mu_0} B^2 V \sin \varphi,$$

де  $M_2$  – величина моменту, обумовленого геометричною формою частинки;  $\chi$  – магнітна сприйнятливість ЕО;  $Q$  – розмагнічувальний фактор.

Встановлено, що епоксидна смола (ЕС), піддана дії ЗПМП протягом 0,3 год, набуває своєрідного ефекту структурної “пам'яті”, який може бути використаний при створенні полімерних композитних матеріалів на її основі.

Авторами праці [23] було показано, що дія магнітних полів приводить до зміни структури ЕС як на молекулярному, так і на надмолекулярному рівнях. Була запропонована модель, згідно з якою на магнітоанізотропну молекулу в однорідному магнітному полі діє орієнтувальний магнітний момент:

$$M = \frac{\Delta\chi}{2\mu_0} B^2 V \sin 2\alpha,$$

де  $\Delta\chi$  – різниця магнітної сприйнятливості в напрямках паралельному і перпендикулярному до осі молекули;  $V$  – об'єм молекули;  $\alpha$  – кут між напрямками осі молекули і поля;  $B$  – індукція магнітного поля;  $\mu_0$  – магнітна стала.

Очевидно, орієнтувальній дії перешкоджає тепловий рух. При цьому ступінь орієнтації для сукупності молекул визначається больцманівським фактором  $e^{-\beta}$ , де  $\beta$  – величина, яка характеризує відношення енергії магнітного поля до теплової енергії і визначається

$$\beta = \frac{\Delta\chi H^2}{2kT}, \quad (1)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура.

Однорідне магнітне поле, діючи на процес затвердіння ЕС, внаслідок наявності орієнтувального моменту сприяє виникненню упорядкованих утворень. У зразках ЕС, затверднених поліетиленполіаміном (ПЕПА) у постійному магнітному полі ( $H = 6,4 \cdot 10^5$  А/м), спостерігалось зміщення температури склування від 359 до 370–371 К. Це підтверджує висновок про збільшення ступеня впорядкування структури в ЕС під дією однорідного магнітного поля. Неоднорідне магнітне поле приводить до розподілу анізотропних морфологічних утворень уздовж градієнта поля, сприяє зміні фізико-механічних властивостей матеріалу. Електронно-мікроскопічні дослідження показали, що в результаті дії неоднорідного магнітного поля розміри надмолекулярних утворень значно збільшуються. Ці утворення не мають чітко вираженої глобулярної форми. Під дією неоднорідного зовнішнього магнітного поля (ЗМП) макромолекули орієнтуються і зміщуються вздовж його градієнта, утворюючи зшиті анізотропні структури, витягнуті перпендикулярно до напрямку силових ліній поля. Відповідно, в зоні найбільшої напруженості поля зростає густина [24].

При накладанні однорідного ЗПМП [25] утворюється нерівномірний розподіл осей молекул за кутами обертання, який описується функцією

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta \cos \varphi x(t)],$$

де  $\beta$  – величина, яка характеризує відношення енергії магнітного поля до теплової енергії і визначається згідно з рівнянням (1);  $x(t) =$

$= \frac{1 - e^{D\sigma t}}{\sigma}$  – функція, яка характеризує встановлення орієнтації залежно від часу дії магнітного поля  $t$ , в якій  $D$  – коефіцієнт обертальної дифузії;  $\sigma = 1 - \beta \frac{\cos 2\varphi}{\cos \varphi}$ .

При вивченні впливу однорідного ЗПМП на структуру і властивості сітчастих полімерів на основі епоксидних діанових смол ЕД-16 і ЕД-20 було встановлено, що ЕП, затверднений у ЗПМП, набуває анізотропії пружних і оптичних характеристик. Важливою є також стабільність набутих анізотропних властивостей одер-

жаного матеріалу щодо теплової обробки. Показано, що з точки зору використання в оптичному моделюванні такого матеріалу оптимальним є режим магнітної обробки з величиною напруженості магнітного поля близько  $80 \cdot 10^3$  чи  $200 \cdot 10^3$  А/м [26].

При вивченні термостійкості епоксидного зв'язуючого, затвердненого в ЗПМП ( $H = 9,5 \cdot 10^3$  А/м), було показано зростання цієї величини [27]. Скажімо для зразків, затверднених без поля, термостійкість становила 443 К, а для зразків, затверднених у полі, – 458 і 473 К залежно від режиму затвердіння. Результати з термічної деструкції, отримані методом диференційного термічного аналізу (ДТА), показали, що при затвердінні зв'язуючого в магнітному полі деструкція починається за вищих температур, ніж при затвердінні без поля. Отже, з дослідження температурних характеристик можна зробити висновок, що при затвердінні ЕП у магнітному полі відбувається утворення впорядкованих структур, що збільшує термостійкість і зміщує температуру процесу термічної деструкції в область вищих температур.

У праці [28] проводили дослідження ЕС ЕД-5, затвердненої поліетиленполіаміном (ПЕПА), яку витримували в ЗПМП ( $H = 6,4 \cdot 10^5$  А/м) за  $T = 353 \pm 5$  К протягом 0,3 год. При цьому розривна міцність зразків збільшувалась приблизно в 2 рази. Це пояснюється тим, що створення орієнтаційного стану в аморфних термопластах і терморектопластах супроводжується збільшенням їх твердості та однорідності структурного стану.

Збільшення порядку в укладанні молекул у різних полімерах і утворення більш дрібних структурних одиниць у ЗПМП описано у ряді праць. Наприклад, для ЕД-20, затвердненої у ЗПМП, з'являються рефлекси на рентгенодифрактограмі, що може свідчити про орієнтацію бензолних кілець і всієї молекули, при цьому можуть виникати сильні водневі зв'язки всередині глобул [18].

Автори праць [29, 30] проводили затвердіння ЕП безпосередньо в магнітному полі. Методом рентгенографії встановлено, що магнітне поле приводить до орієнтації молекул уздовж напрямку прикладеного поля, яке збільшується з ростом напруженості поля. Орієнтація молекул своєю чергою приводить до анізотропії коефіцієнта лінійного температурного розширення.

Механічні властивості ЕП з нанорозмірним типом наповнювача, сформованих у зов-

нішньому магнітному полі (ЗМП), вивчали автори праць [31, 32]. Було показано, що під дією сильних магнітних полів внаслідок орієнтаційних ефектів у нанокompозитах підвищується температура склування, збільшуються міцність та жорсткість цих систем.

У праці [20] вивчалися наповнені композити на основі епоксидного полімеру та наповнювачів феромагнітної (червоний шлам), парамагнітної (TiC,  $B_4C$ ) та діамагнітної ( $SiO$  і  $Al_2O_3$ ) природи, оброблені височастотним магнітним полем (ВЧМП) із частотою 1–100 МГц і напруженістю 100 А/м, що дає змогу значно збільшити енергію взаємодії феро- та парамагнітних частинок наповнювача з макромолекулами зв'язуючого. Обробка магнітним полем досліджуваних композитів дає змогу отримати матеріали з однорідною впорядкованою структурою та покращеними фізико-механічними характеристиками лише за використання наповнювачів феро- і парамагнітної природи, що супроводжується підвищенням адгезійної міцності на 10–15 %, а обробка ЗМП композитів, наповнених діамагнетиками, істотно не впливає на величину їх адгезійної міцності. При накладанні ЗМП абсолютне значення магнітного моменту феромагнітної частинки зростає, а його напрямок змінюється у напрямку напруженості магнітного поля. Відповідно, частинка намагнічується й інтенсивніше взаємодіє з макромолекулами зв'язуючого з утворенням фізичних зв'язків уже на початкових стадіях зшивання епоксикомпозитів. Отже, навколо феромагнітних частинок наповнювачів при накладанні зовнішнього поля формується зовнішній поверхневий шар із високим ступенем зшивання, внаслідок чого адгезійна й когезійна міцність композитів істотно зростають після магнітної обробки матеріалів, які містять феромагнітні дисперсні частинки. Це додатково підтверджує висловлене вище припущення про існування подвійного електричного шару на межі поділу фаз [33].

Внаслідок впливу зовнішнього ВЧМП підсилене магнітне поле наповнювача спрямовує полярні ланцюги макромолекул зв'язуючого, що зумовлює формування орієнтованих граничних шарів. Отже, можна сказати, що магнітне поле попереджує агрегацію структурних елементів і дає змогу сформувати орієнтовану просторову ґратку наповнювача в матриці. Під дією ВЧМП відбувається впорядкування структури полімерної матриці, що сприяє зниженню в'язкості композицій, поліпшенню змочуваності на-

повнювача, формуванню навколо його поверхні адсорбційного шару з підвищеними фізико-механічними показниками.

На основі результатів досліджень у праці [34] встановлено синергічний вплив магнітної природи дисперсного наповнювача та зовнішнього ВЧМП на поліпшення взаємодії макромолекул ЕП з поверхнею наповнювача, що істотно збільшує густину зшивання матеріалу в поверхневих шарах і позитивно впливає на адгезійні та когезійні властивості ЕП.

### Висновки

На основі проведеного аналізу літератури можна зробити висновок про ефективність застосування магнітного поля, напруженість якого перебуває в діапазоні  $10^3$ – $10^5$  А/м, для ство-

рення полімерних матеріалів із покращеними фізико-хімічними та фізико-механічними властивостями. Встановлено, що магнітне поле істотно впливає на структуру та властивості полімерних композитів із ферромагнітним і парамагнітним наповнювачем, ніж з діаманітним. Полімерні матеріали, отримані в магнітному полі, характеризуються більш упорядкованою структурою, внаслідок орієнтації полімерних ланцюгів і частинок наповнювача; це супроводжується підвищенням міцності, покращенням теплофізичних, діелектричних, термо-механічних, електрофізичних та інших властивостей.

У подальшому бажано було б провести дослідження впливу електричних полів на структуру та властивості епоксидних полімерів і їх композитів.

1. Стадник А.Д., Кирик Г.В. Полимерные композиты и нанокompозиты в магнитных полях. – Сумы: Слобожанщина, 2005. – 240 с.
2. Кирик Г.В., Радзиевский В.Н., Стадник А.Д. Новые композиционные материалы. – Сумы: Университетская книга, 2011. – 310 с.
3. Вплив постійного магнітного поля на структуру композитів на основі епоксидного полімеру та оксиду Fe(III) або Al(III) / В.Л. Демченко, В.І. Штомпель, В.О. Віленський, Ю.Ю. Керча // Полімер. журн. – 2008. – 30, № 4. – С. 302–310.
4. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. 2. – М.: Большая рос. энциклопедия, 1994. – 703 с.
5. Калашиников С.Г. Электричество. – М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит-ры, 1956. – 664 с.
6. Песчанская Н.Н., Якушев П.Н. Ползучесть полимеров в постоянном магнитном поле // Физика твердого тела. – 1997. – 39, вып. 9. – С. 1690–1692.
7. Шипилевский Б.А. Формирование и регулирование свойств эпоксидных композитов. – Ташкент: ФАН, 1979. – 112 с.
8. Егорова Л.Н. Композиционные материалы с улучшенными свойствами на основе эпоксидных олигомеров, подвергнутых воздействию магнитных полей: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М.: МХТИ, 1979.
9. Алиева С.М. Разработка новых методов структурной модификации полиолефинов в процессе их переработки: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М.: МХТИ, 1978.
10. Электропроводящие полимерные материалы / В.Е. Гуль, Л.Н. Царский, Н.С. Майзель и др. – М.: Химия, 1968. – 248 с.
11. Рамазанов М.А., Керимли С.Дж., Садыхов Р.З. Влияние постоянного магнитного поля на прочностные, диэлектрические и магнитные свойства композиций на основе полимеров и ферромагнетиков // Пласт. массы. – 2005. – № 10. – С. 5–7.
12. Григорьев Е.И., Завьялов С.А., Чвалун С.Н. Влияние магнитного поля на проводимость поли-п-ксилиленовых пленок, содержащих наночастицы железа и никеля // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2003. – 45, № 8. – С. 1308–1313.
13. L.T. Cai et al., “Effects of the magnetic field on the polyaniline film studied by in situ conductivity measurements and X-ray diffraction”, J. Electroanal. Chem., vol. 421, no. 1-2, pp. 45–48, 1997.
14. Влияние однородного магнитного поля на механическое поведение мягких магнитных эластомеров при сжатии / С.С. Абрамчук, Д.А. Гришин, Е.Ю. Крамаренко и др. // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2006. – 48, № 2. – С. 245–253.
15. Влияние магнитного поля на упругие и вязкие свойства магнитоэластиков / Л.В. Никитин, Л.С. Миронова, Г.В. Степанов, А.Н. Самусь // Там же. – 2001. – 43, № 4. – С. 698–706.
16. Ахизер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
17. Вплив наповнювачів і зовнішніх силових полів на параметр жорсткості ПВХ-композицій / В.О. Сідлецький, Б.С. Колупаєв, В.А. Машенко та ін. // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. – 2000. – Вип. 8. – С. 42–43.
18. Родин Ю.П. Постоянные магнитные поля и физико-механические свойства полимеров // Механика композитных материалов. – 1991. – № 3. – С. 490–503.

19. *I. Petrova et al.*, "Investigation of influence of constant magnetic fields on the structure and properties of chloroprene latex based films", *Polymer Testing*, vol. 24, no. 8, pp. 1036–1040, 2005.
20. *Букетов А.В., Стухляк П.Д., Кальба Є.М.* Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
21. *Yu.P. Rodin and V.P. Khorkov*, "Effect of a constant magnetic field on the structure of the components of an epoxy compound. Part 1. Diglycidyl ether of diphenylpropane", *Mech. Composite Mater.*, vol. 30, no. 6, pp. 839–842, 1994.
22. *Родин Ю.П., Молчанов Ю.М.* Ориентация молекул эпоксидных олигомеров в однородном постоянном магнитном поле // *Механика композитных материалов*. – 1982. – № 6. – С. 1056–1059.
23. *Молчанов Ю.М., Родин Ю.П., Кисис Э.Р.* Некоторые особенности структурных изменений эпоксидной смолы под воздействием магнитных полей // *Механика полимеров*. – 1978. – № 4. – С. 583–587.
24. *Молчанов Ю.М., Родин Ю.П., Кисис Э.Р.* Воздействие неоднородного магнитного поля на полимерные материалы // *Механика полимеров*. – 1976. – № 3. – С. 916–918.
25. *Родин Ю.П., Молчанов Ю.М.* Поведение макромолекул атактического полистирола в однородном постоянном магнитном поле // *Механика композитных материалов*. – 1982. – № 4. – С. 671–678.
26. *Малежик М. П., Січкач Т. Г.* Модифікація фізико-механічних властивостей епоксидних полімерів на стадії їх формування в магнітному полі // *Фізика конденсованих високомолекулярних систем*. – 1997. – Вип. 3. – С. 68–71.
27. *Изменение* температурных характеристик эпоксидных связующих под действием магнитного поля / *А.Н. Кваша, Т.А. Манько, А.В. Соловьев и др.* // *Механика композитных материалов*. – 1983. – № 3. – С. 544–546.
28. *Молчанов Ю.М., Кисис Э.Р., Родин Ю.П.* Структурные изменения полимерных материалов в магнитном поле // *Механика полимеров*. – 1973. – № 4. – С. 737–761.
29. *L. Pottié et al.*, "Investigation of anisotropic epoxy-amine thermosets synthesised in a magnetic field", *Liquid Crystals*, vol. 35, pp. 913–924, 2008.
30. *C.B. Benicewicz et al.*, "Magnetic Field Orientation of Liquid Crystalline Epoxy Thermosets", *Macromolecules*, vol. 31, no. 15, pp. 4730–4738, 1998.
31. *E. Camponeschi et al.*, "Properties of carbon nanotube–polymer composites aligned in a magnetic field", *Carbon*, vol. 45, pp. 2037–2046, 2007.
32. *H. Mahfuz et al.*, "Enhancement of strength and stiffness of epoxy-based composites using nanoparticle infusion and high magnetic fields", *Mater. Letters*, vol. 61, pp. 2535–2539, 2007.
33. *Букетов А.В.* Закономірності впливу обробки енергетичними полями зв'язуючого і наповнювачів на властивості епоксикомпозитних матеріалів для захисних покриттів: Дис. ... докт. техн. наук : 05.02.01. – Київ, 2007. – 337 с.
34. *Букетов А.В.* Про синергізм впливу магнітного поля та магнітної природи наповнювача на характеристики епоксикомпозитів // *Вісник ХДТУСГ*. – 2003. – Вип. 20. – С. 385–390.