

УДК 539.2 : 678.01 : 539.2 : 537.212

Особливості впливу зовнішнього магнітного поля на структуру і властивості полімерів та їх композитів

В.Л. Демченко

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна

Огляд присвячено аналізу впливу магнітного поля на структуру і властивості полімерів. Аналіз проведених досліджень впливу магнітних полів на ненаповнені полімери та композити на їх основі дає змогу розмежувати ефекти, пов'язані із взаємодією полімерної матриці з магнітним полем, і ефекти, зумовлені структуруванням феромагнітних наповнювачів. Показано ефективність застосування магнітного поля при синтезі і фізико-хімічних способах модифікації полімерів. Механізм впливу магнітного поля та його ефективність залежать від магнітних властивостей матеріалу.

Ключові слова: магнітне поле, напруженість магнітного поля, полімерний композит, структура, фізико-механічні властивості.

Вступ.

Останнім часом значна увага приділяється розробці методів модифікації наповнених полімерних матеріалів зовнішніми фізичними полями, а саме: ультразвуковим, електроіскровим, магнітним, електричним та ін. Це відкриває принципово нові можливості для створення композитних матеріалів із покращеними характеристиками. Як правило, використання традиційних методів модифікації полімерів наповнювачами різної природи з метою покращення їхніх властивостей, особливо електропровідності, теплопровідності та магнітних властивостей, передбачають введення в полімерну матрицю значних концентрацій металовмісного наповнювача, що супроводжується погіршенням механічних властивостей. Використання магнітного поля дає змогу отримувати полімерні матеріали з покращеними властивостями за рахунок упорядкування їхньої структури шляхом орієнтації полімерних ланцюгів і частинок наповнювача.

Незважаючи на великі потенціальні можливості та перспективи практичного застосування полімерних композитів з покращеними властивостями, проблема регулювання їхньої структури в магнітних полях далека від вирішення.

Метою цієї роботи було проаналізувати літературні джерела щодо впливу магнітного поля на структуру та властивості полімерних композитних матеріалів.

Результати досліджень та їх обговорення.

Згідно із сучасними уявленнями, магнітні властивості речовини зумовлюються 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 [1].

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 напрямкі силових ліній магнітного поля таким чином, що парамагнетик намагнічується. Намагнічення *феромагнетиків* у ЗПМП зумовлюється переорієнтацією векторів намагнічення доменів у напрямі прикладеного поля, яке включає зміщення, обертання і парапроцес, причому внутрішнє поле в доменах набагато перевищує прикладене поле [2].

Вплив постійних магнітних полів на властивості полімерів пояснюється орієнтацією фрагментів макромолекул із високими значеннями анізотропії *магнітної сприйнятливості* [3] – величини, яка характеризує здатність речовини намагнічуватись у ЗПМП.

Із літературних джерел відомо, що ЗПМП має більш істотний вплив на полімерні композити за участю дисперсних феромагнітних наповнювачів, ніж для композитів з діамагнітним типом наповнювача [4–6]. У роботі [4] досліджувались композити на основі поліетилену високої густини (ПЕВГ), наповненого феромагнітними наповнювачами, зокрема, Fe_2O_3 ; NiO ; MnO_2 ; 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.

Електрофізичні властивості полімерних композитних матеріалів, сформованих у ЗПМП, вивчалися у роботах [7, 8]. Для нанокompозитів Fe–полі-*n*-ксилилен у ЗПМП ($H = 8,8 \cdot 10^5$ А/м) спостерігався значний ефект зміни гігантського магнітного опору за кімнатної температури (на 36 %), тоді як для нанокompозитів Ni–полі-*n*-ксилилен цей ефект значно нижчий [7]. Це пояснюється тим, що поверхневі електронні стани на границі полімерна матриця – наночастинка, які виникають при хімічній взаємодії наночастинок з полі-*n*-ксилиеном, сильно впливають на магнітний опір нанокompозитів.

Відомо, що ЗПМП значною мірою впливає на деформаційні властивості полімерів [9–11]. Автори роботи [11] вивчали дію однорідного магнітного поля ($B = 0 \pm 2$ Тл) на механічну поведінку композитів на основі рідкого силіконового каучуку і дисперсних наповнювачів – порошоків магнетиту та металічного заліза. Було показано, що в деяких випадках (для зразків із великим вмістом магнітних частинок за великих значень B) магнітне поле практично фіксувало деформацію зразка. Під дією прикладеного навантаження зразок, за невеликого значення його початкового модуля зсуву, значно деформується. В деформованому стані для мінімізації загальної енергії в однорідному магнітному 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 їхнього 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 вивчали автори роботи [12]. При дослідженні дії однорідного магнітного поля ($H = (58,1; 106,7; 135,3) \cdot 10^3$ А/м) на в'язкопружні властивості магнітоеластиків показано, що найбільшого значення модуль Юнга досягає при 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 потенціала взаємодії [13]:

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

де: μ_0 – магнітна стала; m_1, m_2 – магнітні моменти частинки; 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 магнітоеластика, 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_{Mj}) циліндричні області стисненого полімеру.

У роботах [14, 15] досліджували вплив ЗПМП ($B = 0,2$ Тл) на формування структури композитів на основі полівінілхлориду (ПВХ) і високодисперсних наповнювачів V та Fe_3O_4 . Було показано, що ЗПМП впливає на процеси структуроутворення в гетерогенних полімерних системах, при цьому структурні зміни відбуваються саме в граничних шарах. Це дає можливість спрямовано регулювати їхні макровластивості.

Магнітна обробка матеріалів у багатьох випадках дає змогу впорядкувати структуру і значно підвищити міцність матеріалів [16, 17]. В огляді [16] 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 епоксикompозитних матеріалів зовнішніми полями в процесі формування покращує їхні характеристики внаслідок орієнтації ланцюгів макромолекул [18, 19].

У роботах [20–24] проведено дослідження основних закономірностей впливу ЗПМП на структуру і властивості полімерних композитів на основі епоксидного полімеру (ЕП) та оксидів металів (Al_2O_3 або Fe_2O_3) або їх сумішей із поліаніліном (ПАН). За результатами досліджень встановлено, що під впливом ЗПМП відбувається зменшення мікрообластей гетерогенності (I_p) полімерних систем на основі епоксидного полімеру і Al_2O_3 або Fe_2O_3 та частково зростає період ближнього упорядкування фрагментів міжвузлових молекулярних ланок епоксидної смоли ЕД-20. Встановлені структурні перетворення композитів, сформованих під дією ЗПМП, приводять до підвищення їхньої термостійкості, тепло- і електропровідності. Показано, що внаслідок орієнтаційної дії ЗПМП

електропровідність композитів із сумішами ПАН і одного з оксидів металів зростає на 2–4 порядки.

Методом ІЧ-спектроскопії вивчали вплив однорідного ЗПМП ($H = 4 \cdot 10^5$ А/м) на орієнтацію молекул епоксидних олігомерів (ЕО) [25]. Була запропонована модель, згідно з якою молекули ЕО – лінійні з малим коефіцієнтом полімеризації (зазвичай, $n = 0 \div 2$), тому можна уявити їх у вигляді жорстких анізодіаметричних частинок, які в однорідному ЗПМП орієнтуються під дією результуючого оберտального 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; μ_0 – магнітна стала; V – об'єм частинки; φ – 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; χ – 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 (ПКМ) на її основі.

Авторами [26] 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 осі молекули; V – об'єм молекули; α – кут між напрямками осі молекули і поля; B – індукція поля; μ_0 – магнітна стала.

Очевидно, орієнтувальній дії перешкоджає тепловий рух. При цьому ступінь орієнтації для сукупності молекул визначається больцманівським фактором e^{β} , де β – 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 затвер-

діння 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 зростають. Ці утворення не мають чітко вираженої глобулярної форми. Згідно з моделлю, за якою глобули – це макромолекули, занурені в матрицю низькомолекулярної маси, ці утворення є агрегатами кількох макромолекул. Під дією неоднорідного зовнішнього магнітного поля (ЗМП) макромолекули орієнтуються і зміщуються вздовж його градієнта, утворюючи зшиті анізотропні структури, витягнуті перпендикулярно напрямку силових ліній поля. Відповідно в зоні найбільшої напруженості поля зростає густина [27]. Отже, якщо затвердіння ЕС проводити безпосередньо в магнітному полі, то в результаті хімічної реакції приєднання відбувається послідовна і краща вибіркова фіксація структурного стану та ступінь упорядкування зростає.

Згідно з роботою [28], при накладанні однорідного ЗПМП утворюється нерівномірний розподіл осей молекул за кутами обертання, який описується функцією:

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

де: β – величина, яка характеризує відношення енергії магнітного поля до теплової енергії і визначається згідно

з рівнянням (1); $x(t) = \frac{1 - e^{D\sigma}}{\sigma}$ – функція, яка характе-

ризує встановлення орієнтації залежно від часу дії магнітного поля t ; 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 ЕД-16 та ЕД-20 було встановлено, що ЕП, затверднений в ЗПМП, набуває анізотропії пружних і оптичних характеристик. Важлива також стабільність набутих анізотропних властивостей отриманого матеріалу щодо теплової обробки. Показано, що при використанні 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 [29].

При вивченні термостійкості епоксидного зв'язуючого, затвердненого в ЗПМП ($H = 9,5 \cdot 10^3$ А/м), було показано зростання цієї величини [30]. Так, для зразків,

затверднених без поля, термостійкість становила 443 К, а для зразків, затверднених у полі, 458 і 473 К залежно від режиму затвердіння. Результати 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 підвищує термостійкість і змінює температуру процесу термічної деструкції в область вищих температур.

У роботі [31] проводили дослідження ЕС ЕД-5, затвердненої поліетиленполіаміном (ПЕПА), яку витримували в ЗМП ($H = 6,4 \cdot 10^5$ А/м) за $T = 353 \pm 5$ К протягом 0,3 год. При цьому розривна міцність зразків зростала приблизно в 2 рази. Це пояснюється тим, що створення орієнтаційного стану в аморфних термопластах і терморектопластах супроводжується підвищенням їхньої твердості та покращенням однорідності структурного стану.

Збільшення порядку в укладанні молекул і утворення дрібніших структурних одиниць у ЗМП спостерігали в ряді робіт на різних полімерах. Наприклад, в ЕД-20, затвердненій у ЗМП, з'являються кристалічні рефлексії на рентгенодифрактограмі внаслідок орієнтації бензольних кілець і всієї молекули, а також утворюються сильні водневі зв'язки всередині глобул [32].

Автори [33, 34] проводили затвердіння ЕП безпосередньо в магнітному полі. Методом рентгенографії встановлено, що магнітне поле приводить до вирівнювання молекул вздовж напрямку прикладеного поля, яке збільшується з ростом напруженості поля. Орієнтація молекул, у свою чергу, приводить до анізотропії коефіцієнта лінійного температурного розширення.

Також проводили термомагнітну обробку епоксидних полімерів [35]. Методами рентгеноструктурного аналізу, інфрачервоної спектроскопії та електронної мікроскопії встановлено, що термомагнітна обробка ($H = (8 \div 16) \cdot 10^3$ А/м) не викликає хімічних змін у структурі матеріалу, однак внаслідок орієнтувального ефекту магнітного поля відбувається зміна просторової структури молекул. При проведенні термозатвердіння в магнітному полі спостерігається ущільнення будови макромолекул, зростає далекий порядок у розташуванні атомів [36].

Механічні властивості ЕП з нанорозмірним типом наповнювача, сформованих у ЗМП, вивчали автори [37, 38]. Було показано, що під дією сильних магнітних полів внаслідок орієнтаційних ефектів у нанокompозитах підвищуються температура склування, міцність і жорсткість цих систем.

Автори [39] вивчали наповнені композити на основі ЕП і наповнювачів феромагнітної (червоний шлам),

парамагнітної (TiC , B_4C) та діамагнітної (SiO і Al_2O_3) природи, оброблені високочастотним магнітним полем (ВЧМП) із частотою $1 \div 100$ МГц і напруженістю 100 А/м, що дало змогу значно збільшити енергію взаємодії феро- та парамагнітних частинок наповнювача з макромолекулами зв'язуючого. Обробка досліджуваних композитів магнітним полем дала змогу отримати матеріали з однорідною впорядкованою структурою та покращеними фізико-механічними характеристиками тільки при використанні наповнювачів феро- та парамагнітної природи, що супроводжується підвищенням адгезійної міцності на 10–15 %, а обробка ЗМП композитів, наповнених діамагнетиками, істотно не впливає на величину їхньої адгезійної міцності. При накладанні ЗМП абсолютне значення магнітного моменту феромагнітної частинки зростає, а його напрямок змінюється у бік напруженості магнітного поля. Відповідно, частинка намагнічується і 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 [40].

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 відіграє роль диспергатора, який 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, покращенню змочуваності наповнювача, формуванню навколо його поверхні адсорбційного шару з підвищеними фізико-механічними показниками.

Встановлено синергійний вплив магнітної природи дисперсного наповнювача та зовнішнього ВЧМП на покращення взаємодії макромолекул ЕП з поверхнею наповнювача, що істотно збільшує густину зшивання матеріалу в поверхневих шарах і позитивно впливає на адгезійні та когезійні властивості ЕП [41].

Висновки.

Проведений аналіз літератури вказує на ефективність застосування магнітного поля для створення полімерних матеріалів із покращеними фізико-хімічними та фізико-механічними властивостями. Композитні матеріали, сформовані у зовнішньому магнітному полі за участю дисперсних феромагнітних наповнювачів, істотно змінюють свою структуру та властивості,

порівняно із матеріалами, які містять діамагнітний наповнювач. Полімерні матеріали, отримані в магнітному полі, характеризуються більш упорядкованою структурою, що пояснюється

орієнтацією полімерних ланцюгів і частинок наповнювача; це приводить до підвищення міцності, покращення теплофізичних, діелектричних, термомеханічних, електрофізичних та інших властивостей.

Література

1. Физическая энциклопедия. В 5 томах. Т. 2. – М. : Большая российская энциклопедия, 1994. – 703 с.
2. Калашиников С. Г. Электричество. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической л-ры, 1956. – 664 с.
3. Песчанская Н. Н., Якушев П. Н. // Физика твердого тела. – 1997. – **39**, вып. 9. – С. 1690–1692.
4. Рамазанов М. А., Керимли С. Дж., Садыхов Р. З. // Пласт. массы. – 2005. – № 10. – С. 5–7.
5. Купорев Б. А., Виленский В. А., Гончаренко Л. А. // Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б. – 2001. – **43**, № 3. – С. 536–541.
6. Виленський В. О., Гончаренко Л. А., Глієва Г. Є., Виленська Л. М. // Полімер. журн. – 2006. – **28**, № 3. – С. 201–208.
7. Григорьев Е. И., Завьялов С. А., Чвалун С. Н. // Высокомолекуляр. соединения. Сер. А. – 2003. – **45**, № 8. – С. 1308–1313.
8. Аббасов Т. Ф., Оруджев А. О., Халафов Ф. Р. и др. // Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б. – 2000. – **42**, № 2. – С. 1060–1064.
9. Песчанская Н. Н., Смолянский А. С., Рылов А. В. // Физика твердого тела. – 2002. – **44**, вып. 9. – С. 1711–1714.
10. Песчанская Н. Н., Якушев П. Н. // Физика твердого тела. – 2003. – **45**, вып. 6. – С. 1130–1134.
11. Абрамчук С. С., Гришин Д. А., Крамаренко Е. Ю. и др. // Высокомолекуляр. соединения. Сер. А. – 2006. – **48**, № 2. – С. 245–253.
12. Никитин Л. В., Миронова Л. С., Степанов Г. В., Самусь А. Н. // Высокомолекуляр. соединения. Сер. А. – 2001. – **43**, № 4. – С. 698–706.
13. Ахизер А.И., Барьяхтар В.Г., Пелетминский С.В. Спиновые волны. – М. : Наука, 1967. – 368 с.
14. Левчук В. В., Демчук В. Б. // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. – 2000. – Вип. 8. – С. 37–39.
15. Сідлецький В. О., Колупаєв Б. С., Мащенко В. А. та ін. // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. – 2000. – Вип. 8. – С. 42–43.
16. Родин Ю. П. // Механика композит. материалов. – 1991. – № 3. – С. 490–503.
17. Головин Ю. И., Моргунов Р. Б., Ликсутин С. Ю. // Высокомолекуляр. соединения. Сер. Б. – 1998. – **40**, № 2. – С. 373–376.
18. Зеленев Ю. В., Кирик Г. В., Стадник А. Д. // Пласт. массы. – 2003. – № 4. – С. 17–19.
19. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Кальба Є. М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. – Тернопіль : Збруч, 2005. – 182 с.
20. Демченко В. Л., Штомпель В. І., Виленський В. О., Керча Ю. Ю. // Полімер. журн. – 2008. – **30**, № 4. – С. 302–310.
21. Демченко В. Л., Виленський В. О. // Полімер. журн. – 2009. – **31**, № 2. – С. 97–110.
22. Демченко В. Л., Виленський В. О. // Журнал фізичних досліджень. – 2010. – **14**, № 1. – С. 1401(1)–1401(6).
23. Vilensky V. O., Demchenko V. L. // Materials Science. – 2009. – **45**, No 3. – P. 409–416.
24. Виленський В. О., Овсянкіна В. О., Штомпель В. І., Керча Ю. Ю. // Доп. НАН України. – 2004. – № 4. – С. 126–130.
25. Rodin Yu. P., Khorkov V. P. // Mechanics of Composite Materials. – 1994. – **30**, No 6. – P. 839 – 842.
26. Родин Ю. П., Молчанов Ю. М. // Механика композит. материалов. – 1982. – № 6. – С. 1056–1059.
27. Родин Ю. П., Кисис Э. П. Молчанов Ю. М. // Механика полимеров. – 1978. – № 4. – С. 583–587.
28. Молчанов Ю. М., Родин Ю. П., Кисис Э. П. // Механика полимеров. – 1976. – № 3. – С. 916–918.
29. Родин Ю. П., Молчанов Ю. М. // Механика композит. материалов. – 1982. – № 4. – С. 671–678.
30. Малезжик М. П., Січкара Т. Г. // Фізика конденсованих високомолекуляр. систем. – 1997. – Вип. 3. – С. 68–71.
31. Кваша А. Н., Манько Т. А., Соловьев А. В. и др. // Механика композит. материалов. – 1983. – № 3. – С. 544–546.
32. Молчанов Ю. М., Кисис Э. П., Родин Ю. П. // Механика полимеров. – 1973. – № 4. – С. 737–761.
33. Родин Ю. П. // Механика композит. материалов. – 1991. – № 3. – С. 490–503.
34. Pottie L., Costa-Torro F., Tessier M. et al. // Liquid Crystals. – 2008. – **35**. – P. 913–924.
35. Benicewicz C. B., Mark E., Earls S. D. et al. // Macromolecules. – 1998. – **31**, No 15. – P. 4730–4738.
36. Манько Т. А., Кваша А. Н., Соловьев А. В. и др. // Механика композит. материалов. – 1984. – № 4. – С. 589–592.
37. Манько Т. А. // Приднепровский научный вестник. Техн. Науки. – 1998. – № 36. – С. 41–43.
38. Camponeschi E., Vance R., Al-Haik M. et al. // Carbon. – 2007. – **45**. – P. 2037–2046.
39. Mahfuz H., Zainuddin S., Parker M. R. et al. // Materials Letters. – 2007. – **61**. – P. 2535–2539.

40. Букетов А. В. Закономірності впливу обробки енергетичними полями зв'язуючого і наповнювачів на властивості епоксикомпозитних матеріалів для захисних покриттів: дис. ... доктора технічних наук. –

Київ, 2007. – 337 с.

41. Букетов А. В. // Вісник ХДТУСГ. – 2003. – Вип. 20. – С. 385–390.

Надійшла до редакції 26 лютого 2013 р.

Особенности влияния внешнего магнитного поля на структуру и свойства полимеров и их композитов

В.Л. Демченко

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины
48, Харьковское шоссе, Киев, 02160, Украина

Обзор посвящен анализу влияния магнитного поля на структуру и свойства полимеров. Анализ проведенных исследований влияния магнитных полей на ненаполненные полимеры и композиты на их основе позволяет разграничить эффекты, связанные с взаимодействием полимерной матрицы с магнитным полем, и эффекты, обусловленные структурированием ферромагнитных наполнителей. Показана эффективность применения магнитного поля при синтезе и при физико-химических способах модификации полимеров. Механизм воздействия магнитного поля и его эффективность зависят от магнитных свойств материала.

Ключевые слова: магнитное поле, напряженность магнитного поля, полимерный композит, структура, физико-механические свойства.

Features of the influence of an external magnetic field on the structure and properties of polymers and composites

V.L. Demchenko

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine
48, Kharkivske shause, Kyiv, 02160, Ukraine

Review is devoted to the analysis of the influence of magnetic field on the structure and properties of polymers. The analysis of the studies of the effect of magnetic fields on the unfilled polymers and composites based on them allows to differentiate the effects associated with the interaction of the polymer matrix with the magnetic field and effects due to the structuring of ferromagnetic fillers. The efficiency of the application of a magnetic field as in the synthesis, and in physicochemical methods for modifying polymers. The mechanism of action of a magnetic field and its effectiveness depends on the magnetic properties of the material.

Keywords: magnetic field, magnetic field strength, polymer composites, structure, physical and mechanical properties.