

УДК 678.01 : 539.2 : 537.212

В. І. Унрод, В. Л. Демченко

## ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРІВ ТА ЇХНІХ КОМПОЗИТІВ

*Огляд присвячено аналізу літературних джерел по впливу постійного електричного поля на структуру та властивості полімерів та їх композитів. Показано, що полімерні матеріали, отримані в електричному полі, характеризуються більш упорядкованою структурою та покращеними теплофізичними, діелектричними, термомеханічними та електрофізичними властивостями.*

*Ключові слова:* електричне поле, напруженість електричного поля, полімерний композит, структура, фізико-механічні властивості.

Більшість полімерів є діелектриками, однією з основних властивостей яких є здатність до поляризації під дією зовнішнього постійного електричного поля (ЗПЕП).

Відомо, що молекула має постійний дипольний момент, якщо центри розподілу позитивних і негативних зарядів зміщені відносно один одного. Такий диполь існує і за відсутності електричного поля характеризується величиною дипольного моменту:

$$\mu = qd \quad (1)$$

де  $q$  — величина заряду;  $d$  — відстань між зарядами.

В електричному полі відбувається орієнтація дипольних молекул переважно в напрямку поля (при цьому потенціальна енергія диполя мінімальна), і сумарний електричний момент усіх диполів виявляється відмінним від нуля — утворюється так званий орієнтаційний момент ( $\mu_{op}$ ). Отже, в системі з'являється певна впорядкованість у розміщенні молекул, що в одному напрямку переважають негативно заряджені частинки, а в іншому — позитивно, тобто виникає стан поляризації [1].

Для полімерів характерні такі види діелектричної поляризації: 1) електронна поляризація, обумовлена зсувом орбіт руху електронів під впливом зовнішнього поля; 2) атомна поляризація, пов'язана зі зміщенням ядер атомів; 3) поляризація пружнозв'язаних диполів; 4) дипольна поляризація, обумовлена тепловим рухом ділянок макромолекули (або макромолекули як цілого) з постійними дипольними моментами.

---

© Унрод Володимир Ізяславович, канд. техн. наук, професор Черкаського державного технологічного університету, завідувач секції хімії кафедри ХХТНР; Демченко Валерій Леонідович, канд. фіз.-мат. наук, цього ж університету, старший викладач кафедри ХХТНР.

Величина поляризації полімерних діелектриків залежить від кількості диполів в одиниці об'єму полімеру; взаємодії між макромолекулами; дипольного моменту повторюваної ланки макромолекул [2–5].

Якщо на систему діє зовнішнє електричне поле, то змінюється потенціальна енергія взаємодії структурних елементів і, відповідно, ймовірність розміщення макромолекул у різних конформаціях [6].

В працях [7–9] було проведено дослідження основних закономірностей впливу ЗПЕП на структуру і властивості полімерних композитів на основі епоксидного полімеру (ЕП) та оксидів металів ( $Al_2O_3$  або  $Fe_2O_3$ ). Отверднення композитів у вигляді плівок проводили між пластинами плоского конденсатора з величиною напруженості  $E = 3,0 \cdot 10^4$  В/м протягом 10 год.

Встановлено [9], що внаслідок впливу електричного поля на системи на основі ЕП та оксидів металів ( $Al_2O_3$  або  $Fe_2O_3$ ) в процесі їх затвердіння середня величина періоду близького упорядкування фрагментів міжвузлових молекулярних ланок епоксидної смоли:

$$d_{hkl} = n\lambda(2 \sin \theta_m)^{-1}, \quad (2)$$

де  $n$  — порядковий номер дифракційного максимуму;  $2\theta_m$  — кутове положення дифракційного максимуму на профілі розсіювання;  $\lambda$  — довжина хвилі рентгенівського випромінювання (для  $Cu-K_\alpha$  випромінювання  $\lambda = 0,154$  нм) має лише тенденцію до зростання (від  $d \approx 0,50$  до  $d \approx 0,51$  нм).

В праці [9] методом малокутової рентгенографії показано, що під дією постійного електричного поля на мікрогетерогенну структуру композитів із оксидом алюмінію відбувається зменшення величини ефективного розміру мікрообластей гетерогенності  $l_p$  (параметр, який безпосередньо пов'язаний із середнім діаметром різних за величиною локальної електронної густини мікрообластей гетерогенності  $\langle l_1 \rangle$ ,  $\langle l_2 \rangle$ ) у двофазовій системі:

$$l_p = \varphi_2 \langle l_1 \rangle = \varphi_1 \langle l_2 \rangle, \quad (3)$$

де  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  — об'ємна частка  $i$ -го типу мікрообластей ( $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$ ) з 8 нм до 5,7 нм.

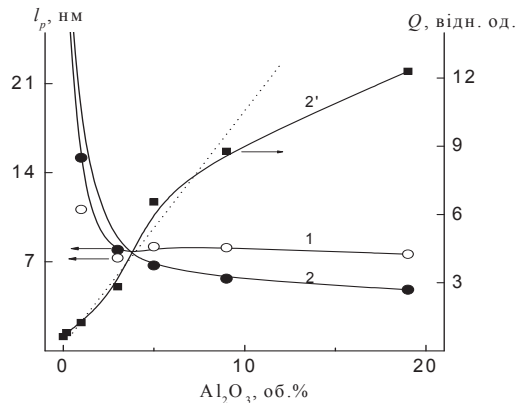


Рис. 1. Концентраційна залежність ефективного розміру  $l_p$  мікрообластей гетерогенності та інваріанту Порода  $Q$  вихідних (1) і сформованих в електричному полі (2 і 2') композитів на основі ЕП і  $Al_2O_3$

Для композитів із оксидом заліза відбувається зростання ефективного розміру мікрообластей гетерогенності  $l_p$ , які формуються безпосередньо на поверхні частинок наповнювача на початковому етапі затвердіння полімерної матриці у цих композитах з 33,5 до 33,7 нм.

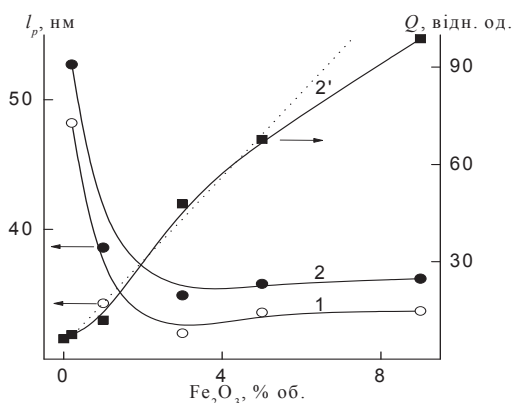


Рис. 2. Концентраційна залежність ефективного розміру  $l_p$  мікрообластей гетерогенності та інваріанту Порода  $Q$  вихідних (1) і сформованих у електричному полі (2 і 2') композитів на основі ЕП і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Для досліджуваних композитів з  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , сформованих під дією ЗПЕП виявлено зростання температури прояву сегментальної рухливості полімерної матриці на 7–10 К і на 4 К для композитів з  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , що обумовлено особливостями взаємодії оксидів металів з полімерною матрицею в умовах дії ЗПЕП.

Встановлено структурні перетворення композитів, сформованих під дією ЗПЕП, приводять до підвищення їх термостійкості, тепло- і електропровідності.

Автори праці [10] вивчали діелектричні та термомеханічні властивості, а також густину аморфних полімерів на основі вінілхлориду, макроланцюги яких відрізнялися кількістю та розташуванням полярних груп, утворених атомом хлору з вуглецем основного ланцюга, в процесі відпалення їх в ЗПЕП ( $E = 100 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ) при температурі на 10 К вищій за температуру склування протягом 1 год. Встановлено, що при відпаленні система наближається до стану термодинамічної рівноваги. Електричне поле гальмує цей процес і, зокрема, конформаційну зміну стану макромолекул. Порівняльний аналіз даних для ПВХ та його кополімерів приводить до висновку, що при відпаленні з електричним полем та без нього визначальними факторами у зміні кінетичних характеристик полімеру є не кількість полярних груп у ланцюзі, а порядок їх розташування в ланках і пов'язана з цим жорсткість ланцюга. Загальним висновком дослідження є те, що дія електричного поля в процесі відпалення або затримує перебудову структури полімеру, або вносить певні зміни у взаємне розташування бічних груп, конформацію, щільність упакування та взаємодію макромолекул. Міру ефекту поля визначає, разом із фактором полярності, фактор гнучкості ланцюга макромолекули та її бічних груп.

Проведене в праці [11] вивчення теплового впливу та його тривалості на структуру та властивості ряду полімерів і кополімерів показало, що процес відпалення допомагає системі наблизитись до термодинамічно-рівноважного стану. Також встановлено, що накладання слабкого електричного поля ускладнює процес наближення системи до стану рівноваги при відпаленні, оскільки це поле викликає поляризацію полімеру-діелектрика, а електричні сили, які

при цьому виникають, створюють особливі умови для процесу перебудови структури полімеру.

Вплив електричного поля ( $E = 100 \cdot 10^5$  В/м) і термообробки на структуру та фізичні властивості ряду полімерів з різною полярністю і гнучкістю ланцюгів — плівок ПВХ і поліакрилонітрилу (ПАН) та їх кополімерів — вивчали в праці [12]. Методом діелектричної релаксації встановлено, що значення діелектричної проникності для плівок, відпалених за умов дії електричного поля, більші, ніж для зразків, відпалених без поля. Це пояснюється тим, що під впливом електричного поля порушуються локальні електронейтральності макромолекули; при цьому макромолекула набуває наведеного дипольного моменту (тобто поляризується); водночас має місце додаткова поляризація у фазі з докладеним полем, що еквівалентно певному внеску до дійсної частини діелектричної проникності полімеру. Розрахунки показують, що додаткова поляризація, викликана електричним полем, становить від 1 до 4% від поляризації плівок, які були відпалені без дії поля і поляризувалися при діелектричних дослідженнях. Тобто під впливом електричного поля в об'ємі полімеру відбувається певна орієнтація ділянок макромолекул і самих макромолекул, і електричне поле протидіє прийняттю макромолекулами енергетично найбільш вигідної конформації — згорнутої. Це відповідно збільшує й ефективний дипольний момент ланки макромолекули, оскільки дипольний момент ланцюга макромолекул дорівнює не сумі дипольних моментів усіх ланок, а сумі проєкцій дипольних моментів ланок на напрямок електричного поля. Тобто в плівках, відпалених за умов дії електричного поля, ланки макромолекул менш розорієнтовані, ніж у зразках, відпалених без дії поля. Ймовірно, електричне поле протидіє в макромолекулах з великим дипольним моментом, додатково поляризованих і до того ж щільноупакованих, певним обертам ділянок ланцюгів — розорієнтації цих ділянок одна відносно одної. Щільність упакування макромолекул при цьому залишається великою, на що вказують більші значення густини й температури продавлювання ( $T_{np}$ ) плівки, відпаленої в електричному полі. Цей результат пояснюється більшою напруженістю ланцюгів, обумовленою примусовою розгорнутістю макромолекул, а дипольно-сегментальний рух у напруженіших ланцюгах відбувається за вищої температури.

Поляризація плівок полімеру відбувається внаслідок намагання зв'язаних у єдиний ланцюг ланок розміститись таким чином, щоб їх дипольні моменти і сильнополяризовані зв'язки були зорієнтовані в напрямку зовнішнього поля. Перебудова структури полімерної плівки при її відпаленні в електричному полі відбувається за умов вимушеної орієнтації полярних груп, що змінює термодинамічний стан системи. Вплив електричного поля на стан системи при відпаленні слід розглядати в єдності термодинамічного та релаксаційного підходів. Зміна термодинамічного потенціалу системи внаслідок зміни температурних умов (відпалення) складається зі зміни внутрішнього потенціалу макромолекул та потенціалу їх взаємодії [13]. При відпаленні полімеру без дії електричного поля основний внесок у термодинамічний потенціал системи робить зміна внутрішнього потенціалу самих макромолекул, а з електричним полем — потенціалу взаємодії макромолекул. У першому випадку відбувається помітна зміна конформаційної ентропії макромолекул. Це завжди супроводжується енергетичними ефектами, оскільки різні конформації відрізняються одна від одної енергетично – при переході макромолекули з однієї конформації в іншу змінюється енергія взаємодії окремих її ділянок і груп. Крім того, зміна внутрішньої енергії обумовлена і зміною оточення будь-якої обраної макромолекули іншими через зміну густини плівки. При відпаленні в електрич-

ному полі за рахунок зміни потенціалу взаємодії власні часи структурної релаксації уповільнюються, і система після відпалення (при  $T < T_c$ ) заморозиться з конформацією макромолекул, близькою до конформації у вихідному (до відпалення) стані системи. Викликаний дією електричного поля стан системи після відпалення залишається більш термодинамічно нерівноважним, ніж стан системи, відпаленої без електричного поля. Таким чином, механізм впливу електричного поля зводиться до кінетичного гальмування електричними силами трансляційного руху сегментів, ускладнення конформаційної перебудови (згорання) макромолекул та переходу системи до стану з мінімумом вільної енергії. Це гальмування слід розглядати як зменшення кінетичної гнучкості макромолекул.

Дослідження впливу електричного поля ( $E = 10 \cdot 10^5$  В/м) на акустичні властивості та густину в процесі пластифікації та антипластифікації ПВХ дибутилфталатом (ДБФ) вивчалися у праці [14]. Встановлено, що під дією ЗПЕП релаксаційні властивості композитів при вмісті ДБФ 0–4% (об.) виявляються більш інтенсивно, тоді як, у міру зростання вмісту ДБФ ( $\varphi \approx 10\%$  (об.)) властивості систем нівелюються. Це пояснюється тим, що при введенні пластифікатора в кількості до 4% (об.) у ПВХ він заповнює насамперед міжмолекулярні області, що супроводжується блокуванням їх вільного об'єму та зміною характеру міжкластерної взаємодії. При подальшому зростанні вмісту ДБФ до 10% (об.) молекули пластифікатора не тільки утворюють мікроагрегації у міжкластерних областях, але й дифундують у кластери ПВХ. При цьому міжкластерні області вже заповнені молекулами пластифікатора, що ускладнює їх подальшу орієнтацію під дією електричного поля, і в результаті вплив його на властивості композиції нівелюється. Отже, зміна характеру концентраційних залежностей динамічних модулів під дією електричного поля зумовлюється орієнтацією молекул пластифікатора в полі, що спричинює перерозподіл вільного об'єму композицій.

Автори праць [15, 16] досліджували вплив постійного електричного поля ( $E = (3,3-13,3) \cdot 10^4$  В/м) на композити на основі поліуретану та АБЦ. Показано, що дія електричного поля на естеруретан та композити на його основі сприяє змінам у надмолекулярній структурі, тоді як у випадку естеруретану такі зміни не спостерігаються внаслідок домінування термодинамічних процесів формування кристалітів поліуретану над ефектами поляризації. Під впливом електричного поля відбувається зниження температури склування гнучких блоків естеруретану [15].

Теорія електричного подвійного променезаломлення (ЕПП) розчинів у сильних електричних полях підтверджується авторами праці [17]. Накладання електричного поля до розчину полімеру викликає орієнтацію оптично анізотропних молекул, наділених постійним дипольним моментом, і приводить до виникнення макроскопічного ЕПП. В області слабких електричних полів, коли потенціальна енергія молекули, що дорівнює добутку її дипольного моменту на величину напруженості  $E$  електричного поля, набагато менша від  $kT$ , подвійне променезаломлення є лінійною функцією  $E^2$ . В області сильних полів потенціальна енергія макромолекули в полі стає сумірною з  $kT$ . У цьому випадку залежність ЕПП ( $\Delta n$  від  $E^2$ ) відхиляється від лінійного закону і наближається до насичення. Тому в сильних полях гранична величина подвійного променезаломлення  $\Delta n$  залежить тільки від оптичної анізотропії молекули.

Електрофізичні властивості металонаповнених полімерних композитів на основі ПВХ, наповненого високодисперсним порошком вольфраму (W), в процесі формування їх структури в ЗПЕП ( $E = 10 \cdot 10^5$  В/м) вивчалися автора-

ми праці [18]. Показано, що накладання ЗПЕП у процесі формування матеріалу приводить до зростання електропровідності систем ПВХ+W. Отримані теоретичні розрахунки підтверджують, що зміна провідності систем ПВХ + W, сформованих у ЗПЕП, відбувається за рахунок явищ, які виникають на границі поділу фаз метал-полімер.

Особливості структури та властивості рідкокристалічних полімерних систем під дією ЗПЕП вивчались у працях [19, 20]. Показано, що в розчинах полієфірів, які мають рідкокристалічні властивості в масі, поряд із діелектричними релаксаційними переходами локального типу виявлено релаксацію дипольної поляризації великомасштабного типу з великими значеннями часів релаксації й енергії активації. Цей процес пов'язаний з кооперативним рухом мезогенних фрагментів в утворених ними асоціатах. У зовнішньому орієнтувальному електричному полі ( $E = 10 \cdot 10^5$  В/м) в розчині полієфірів інтенсивність діелектричного поглинання зростає зазвичай для всіх типів діелектричних переходів; часи релаксації і енергія активації зазнають зміни тільки для великомасштабних процесів [19].

Дія електричного поля на епоксидний полімер та композити на його основі сприяє змінам у їх надмолекулярній структурі та властивостях [21].

Дослідження впливу електричного поля на процес затвердіння і властивості епоксидної композиції вивчали автори праць [22, 23]. Показано, що за умов впливу електричного поля процес утворення тривимірного епоксиполімеру при наявності в системі фосфорвуглецевих волокон [22] перебігає інтенсивніше з утворенням більш жорстко зв'язаної структури полімеру в порівнянні з таким складом, затвердненим поза полем. Встановлено домінуючу роль поверхні поділу фаз "волокнистий наповнювач–зв'язуюче" у формуванні просторово-зшитого полімеру і властивостях затвердненого продукту при затвердінні композицій як за умов впливу електричного поля, так і поза полем.

Автори праць [24, 25] вивчали вплив електромагнітного поля мікрохвильового діапазону випромінювання на міцнісні характеристики та термомеханічні властивості епоксидних композитів. Одержані дані свідчать, що графітонаповнені епоксидні композити мікрохвильового затвердіння не поступаються термічно затвердненим аналогам за механічною міцністю. Суттєва перевага мікрохвильового режиму затвердіння — скорочення тривалості процесу: достатньо вже однієї години мікрохвильового опромінення для одержання епоксиполімерів, які за своїми властивостями цілком відповідають композитам, термічно затвердненим протягом 5 год. Продовження тривалості затвердіння у мікрохвильовому полі до 2 год дещо покращує міцнісні характеристики графітонаповнених епоксидних композицій [24].

Встановлено, що попередня електроіскрова обробка епоксидного зв'язуючого [26–28] з наступним введенням полідисперсного наповнювача зменшує рухливість макромолекул у зовнішніх поверхневих шарах на межі поділу фаз за рахунок взаємодії магнітного поля феромагнітних частинок і радикалів, які виникли при обробці, і забезпечує високий ступінь зшивання внаслідок утворення "жорстких" поверхневих шарів на межі поділу фаз у сформованому матеріалі. Показано, що після попередньої електроіскрової обробки епоксидного олігомеру введення феромагнітного наповнювача приводить до збільшення модуля пружності при згинанні, ударної в'язкості і теплостійкості композитів у 1,5–1,8 раза. Отриманий результат пояснено зростанням ступеня зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах внаслідок взаємодії магнітного поля частинок з вільними радикалами, утвореними в результаті обробки.



В праці [29] було досліджено вплив змінного електричного поля ( $f = 5$  Гц та  $E = 12 \cdot 10^5$  В/м) на термофізичні характеристики полімерних композитів на основі ЕП та дисперсних наповнювачів — частинок графіту та скловолокна. Показано, що під дією електричного поля підвищується теплопровідність, коефіцієнт теплового розширення та покращуються оптичні властивості.

Вплив змінних і постійних електричних полів ( $E = (4-80) \cdot 10^3$  В/м) на структуру та властивості композитів на основі епоксидного полімеру та вуглецевих нанотрубок вивчали в праці [30]. Було успішно продемонстровано, що застосування змінних електричних полів приводить до вирівнювання (орієнтації) вуглецевих нанотрубок в епоксидній матриці.

В працях [31, 32] вивчали вплив електричного поля на структуру та властивості модифікованих карбоновими трубками ЕП. Показано, що орієнтація нанотрубок під дією електричного поля спричинила сильну анізотропію властивостей матеріалу, що своєю чергою привело до збільшення електропровідності в напрямку вирівнювання нанотрубок.

### Висновки

Проведений аналіз літератури вказує на ефективність застосування електричного поля для створення полімерів та композитів на їх основі із покращеними властивостями. Полімерні матеріали, отримані в електричному полі, характеризуються більш упорядкованою структурою, що супроводжується підвищенням міцності, покращенням теплофізичних, діелектричних, термомеханічних, електрофізичних та інших властивостей.

*Обзор посвящен анализу литературных источников по воздействию постоянного электрического поля на структуру и свойства полимеров и их композитов. Показано, что полимерные материалы, полученные в электрическом поле, характеризуются более упорядоченной структурой и улучшенными теплофизическими, диэлектрическими, термомеханическими и электрофизическими свойствами.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, напряженность электрического поля, полимерный композит, структура, физико-механические свойства.

*Review is devoted to the analysis of the literature on the effects of constant electric field on the structure and properties of polymers and their composites. Shown that polymeric materials obtained in an electric field, characterized by a more ordered structure and improve the thermal, dielectric, thermo-mechanical and physical properties.*

**Keywords:** electric field, intensity electric field, the polymer composite, structure, physical and mechanical properties.

1. Тагер А. А. Физикохимия полимеров / А. А. Тагер. – М. : Химия, 1978. – 544 с.
2. Kovalevsky A. Yu. Influence of steric and electronic effects of substituents on the molecular structures and conformational flexibility of 1,8-naphthalenedicarboximies / A. Yu. Kovalevsky, I. I. Ponomarev, M. Yu. Antipin // Russ. Chem. B1. – 2000. – Vol. 49, No. 1. – P. 70–76.

3. *Cummings E. B.* Conditions for similitude between the fluid velocity and electric field in electroosmotic flow / E. B. Cummings, S. K. Griffiths, R. H. Nilson, P. H. Paul // *Anal. Chem.* – 2000. – Vol. 72, No. 11. – P. 2526–2532.
4. *Nobuhiro O.* External electric field effects on fluorescence of methylene-linked D-A systems in polymer films: (Carbazole)-(CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub>-(Terephthalic acid methyl ester) / O. Nobuhiro, K. Masaru, N. Yoshinobu et al. // *J. Phys. Chem.* – 1996. – Vol. 100, No. 50. – P. 19295–19302.
5. *Воронежцев Ю. И.* Электрические и магнитные поля в технологии полимерных композитов / Ю. И. Воронежцев, В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук, В. В. Снежков. – Минск: Наука и техника, 1990. – 262 с.
6. *Веселовский П. Ф.* Сб. Релаксационные явления в твердых телах / П. Ф. Веселовский. – М.: Металургия, 1968. – С. 588–591.
7. *Демченко В. Л.* Вплив магнітного та електричного полів на структуру і властивості наповнених полімерів / В. Л. Демченко, В. О. Віленський // *Полімер. журн.* – 2009. – Т. 31, № 2. – С. 97–110.
8. *Демченко В. Л.* Вплив постійних електричного і магнітного полів на структуру і термомеханічні властивості композитів на основі епоксидного полімеру і оксиду Fe (III) або Al (III) / В. Л. Демченко, В. О. Віленський // *Наук. вісті НТУУ „КПІ“.* – 2009. – № 2. – С. 114–121.
9. *Демченко В. Л.* Особливості структури композитів на основі полімеру сітчастої будови та оксидів Fe(III) і Al (III), сформованих у постійному електричному полі / В. Л. Демченко, В. І. Штомпель, В. О. Віленський // *Полімер. журн.* – 2009. – Т. 31, № 3. – С. 235–243.
10. *Нижник В. В.* Відпалення аморфних полімерів на основі вінілхлориду в умовах дії електричного поля / В. В. Нижник, Л. С. Тонкопієва, Н. П. Мельник, В. В. Дубровська // *Композиц. полімер. матеріали.* – 1998. – Т. 20, № 1. – С. 69–73.
11. *Nizhnic V. V.* Electrically stimulated polarization of polymer composites: structure-properties / V. V. Nizhnic, L. S. Tonkopiieva, V. V. Dubrovska, L. P. Linets // *Functional materials.* – 2000. – Vol. 7, No. 4. – P. 679–681.
12. *Тонкопієва Л. С.* Структурні перетворення полімерних систем при відпаленні в електричному полі / Л. С. Тонкопієва, В. Г. Сиромятніков // *Полімер. журн.* – 2005. – Т. 27, № 4. – С. 249–254.
13. *Бартенев Г. М.* Релаксационные свойства полимеров / Г. М. Бартенев, А. Г. Бартенева. – М.: Химия, 1992. – 384 с.
14. *Максимцев Ю. Р.* Дослідження впливу електричного поля на процеси структуроутворення в пластифікованому полівінілхлориді // *Фізика конденсованих високомолекулярних систем.* – 2000. – Вип. 8. – С. 49–50.
15. *Віленський В. О.* Дослідження впливу постійного електричного поля на процеси структуроутворення в композитах поліестеруретану і ацетобутирату целюлози, отриманих з розчину / В. О. Віленський, В. О. Овсянкіна, В. І. Штомпель, Ю. Ю. Керча // *Доп. НАН України.* – 2004. – № 4. – С. 126–130.
16. *Глиевая Г. Е.* Модифицирование полимерных композитов электрическим и магнитным полями / Г. Е. Глиевая, В. А. Виленский, Л. А. Гончаренко // *Журнал прикладной химии.* – 2008. – Т. 81, № 7. – С. 1145–1149.
17. *Ротинян Т. А.* Электрическое двойное лучепреломление растворов полибутилизотианатов в сильных электрических полях / Т. А. Ротинян, С. В. Люлин, А. В. Лезов и др. // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А.* – 2002. – Т. 44, № 10. – С. 1786–1790.
18. *Мащенко В. А.* Дослідження впливу електричного поля при формуванні структури на електропровідність металонаповнених полімерних композицій / В. А. Мащенко, Б. С. Колупаєв, М. А. Бордюк, Т. В. Рухляк // *Фізика конденсованих високомолекулярних систем.* – 1998. – Вип. 4. – С. 9–12.



19. Степанова Т. П. Влияние внешнего ориентирующего электрического поля на диэлектрическую релаксацию сегментированных полиэфиров в разбавленном растворе / Т. П. Степанова, А. Н. Погребная, В. М. Капралова, С. С. Скороходов // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А.* – 2007. – Т. 49, № 2. – С. 321–328.
20. Тальрозе Р. В. Термотропные жидкокристаллические полимеры в электрических и магнитных полях / Р. В. Тальрозе, В. П. Шибяев, Н. А. Платэ // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А.* – 1983. – Т. 25, № 12. – С. 2467–2487.
21. Zhou Q. Electric field effect on properties of PT/epoxy nanocomposites / Q. Zhou, Q. Zhang, J. Zhang et al. // *Science in China. Ser. A: Mathematics.* – 1998. – Vol. 41, No. 12. – P. 1334–1339.
22. Дубкова В. И. Исследование влияния электрического поля на процесс отверждения и свойства эпоксидной композиции, дискретно армированной фосфоруглеродными волокнами / В. И. Дубкова, Н. П. Крутько // *Инж.-физ. журнал.* – 2007. – Т. 80, № 3. – С. 47–54.
23. Дубкова В. И. Диэлектрическая релаксация эпоксидного полимера при отверждении композиций в электрическом поле / Дубкова В. И., Алексеенко В. И., Маевская О. И. // *Там же.* – 1996. – Т. 69, № 4. – С. 589–597.
24. Білогубка О. Р. Механічна міцність наповнених епоксидних полімерів мікрохвильового отвердження / О. Р. Білогубка, О. В. Шийчук // *Полімер. журн.* – 2006. – Т. 28, № 1. – С. 17–20.
25. Білогубка О. Р. Отвердження епоксидного олігомери ароматичним діаміном у мікрохвильовому полі / О. Р. Білогубка, О. В. Шийчук // *Полімер. журн.* – 2004. – Т. 26, № 3. – С. 201–206.
26. Букетов А. В. Дослідження релаксаційних процесів у епоксикомпозитах після модифікації матриці електроіскровим гідроударом / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, О. В. Тотосько // *Вісник ТДТУ.* – 2005. – № 3. – С. 36–44.
27. Букетов А. В. Епоксикомпозити. Модифікація електроіскровим гідроударом / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, О. В. Тотосько // *Хім. промисловість України.* – 2005. – № 4. – С. 39–43.
28. Букетов А. В. Теплофізичні властивості модифікованих електроіскровою обробкою епоксикомпозитів / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк // *Вісник КНУТД.* – 2006. – Т. 30, № 4. – С. 50–56.
29. Kim G. Thermo-physical responses of polymeric composites tailored by electric field // *Compos. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 65. – P. 1728–1735.
30. Prassea T. Electric anisotropy of carbon nanofibre/epoxy resin composites due to electric field induced alignment / T. Prassea, J. Y. Cavaille, W. Bauhofer // *Ibid.* – 2003. – Vol. 63. – P. 1835–1841.
31. Yue-Feng Z. Alignment of multiwalled carbon nanotubes in bulk epoxy composites via electric field / Z. Yue-Feng, M. Chen, Z. Wei et al. // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105. – P. 054319–054319-6.
32. Martin C. A. Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites / C. A. Martin, J. K. W. Sandler, A. H. Windle et al. // *Polymer.* – 2005. – Vol. 46, No. 26. – P. 877–886.