

DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.14

**П.П. Савчук, Д.М. Матрунчик, В.П. Кашицький, О.Л. Садова, Г.Ю. Петрук**  
*Луцький національний технічний університет*

### **СТРУКТУРУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ**

*Досліджено вплив обробки епоксидних композицій в електромагнітному полі на процеси структурування, формування дефектної структури та міцність епоксидних полімерів. Визначено доцільність стадій охолодження епоксидних композицій після кожної обробки в електромагнітному полі. Встановлено оптимальну кількість циклів обробки, що включає стадії електромагнітного впливу та охолодження. Оптимізовано тривалість витримки на цих етапах.*

*Ключові слова:* склад, електромагнітні поля, теплова енергія, сегменти макромолекул, реактивні групи, міцність на стиск.

**П.П. Савчук, Д.Н. Матрунчик, В.П. Кашицкий, О.Л. Садовая, Г.Ю. Петрук**  
**СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЕПОКСИПОЛИМЕРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

*Исследовано влияние обработки эпоксидных композиций в электромагнитном поле на процессы структурирования, формирования дефектной структуры и прочность эпоксидных полимеров. Определена целесообразность стадии охлаждения эпоксидных композиций после каждой обработки в электромагнитном поле. Установлено оптимальное количество циклов обработки, которое включает стадии электромагнитного воздействия и охлаждения. Оптимизировано продолжительность выдержки на этих этапах.*

*Ключевые слова:* состав, электромагнитные поля, тепловая энергия, сегменты макромолекул, реактивные группы, прочность на сжатие.

**P. Savchuk, D. Matrunchyk, V. Kashytskyi, O. Sadova, G. Petruk**  
**STRUCTURING OF EPOXY POLIMERS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD**

*The influence of treatment of epoxy compositions in the electromagnetic field on the processes of structuring, formation of defect structure and strength of epoxy polymers is investigated. The expediency of the stage of cooling epoxy compositions after each treatment in an electromagnetic field is determined. The optimum number of processing cycles, which includes the stages of electromagnetic impact and cooling, is established. The duration of the shutter speed at these stages is optimized.*

*Keywords:* composition, electromagnetic fields, thermal energy, segments of macromolecules, reactive groups, compressive strength.

**Вступ.** Епоксидні олігомери є основою для створення перспективних і високотехнологічних полімерних композитів [1, 2], у зв'язку з чим закономірності їх формування є об'єктом різностороннього вивчення. Серед матричних композитів епоксидні полімери посідають важливе місце, оскільки при їх твердненні формується просторова сітка, структура якої може бути направлено змінена фізичною і структурною модифікацією [3, 4]. Основними напрямками фізичної модифікації є піддавання полімеру дії зовнішніх фізичних полів (електричного, магнітного, теплового тощо), що дозволить отримати необхідні властивості модифікованого епоксиполімеру.

Однак для створення якісних полімерних матеріалів з покращеними термомеханічними, теплофізичними та іншими властивостями необхідно знати і враховувати комплекс хімічних і фізико-механічних явищ, які відбуваються в процесі структурування полімеру. З наукової та практичної точки зору необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів, зокрема магнітного та електричного полів на структуру та властивості полімерів [5-7].

Практична цінність фізичної модифікації епоксиполімерів полягає в підвищенні швидкості утворення хімічних зв'язків в реактопластах, оскільки за нормальних умов час переходу епоксидного олігомера у твердий стан становить 24...48 год. На виробництві проводити формування за класичним режимом є економічно не вигідним, тому необхідно застосовувати нові ефективні способи обробки, які б забезпечили інтенсифікацію технологічного процесу отримання виробів на основі епоксидних полімерів.

У випадку інтенсифікації процесів структурування реакційноздатних полімерів відбувається формування напруженого стану, який знижує міцнісні характеристики та скорочує ресурс роботи виробів на основі епоксидних полімерів. Тому актуальність роботи полягає у дослідженні процесів

структурування епоксидних полімерів в умовах впливу електромагнітного поля, що дозволить отримати високоміцні композитні матеріали за скороченим режимом формування виробів.

**Мета роботи.** Дослідити вплив тривалості обробки та потужності електромагнітного випромінювання на інтенсивність структурування та міцність епоксиполімерів.

**Матеріали та методика досліджень.** Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), що представляє собою високов'язку рідину з масовою долею епоксидних груп в кількості 20,0–22,5 % та летких речовин 0,2–0,8 %. Для структурування епоксидних смол при кімнатній та знижених температурах в умовах підвищеної вологості застосовують твердник поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70).

Формування дослідних зразків полягало в отриманні однорідної маси, до складу якої входили дозовані порції епоксидної смоли та твердника. Для забезпечення високої однорідності системи проведено механічне вимішування з низькою частотою обертання лопатей для запобігання нагріву в'язкої композиції. Підготовлену композицію заливали у спеціальні одноразові форми та піддавали впливу електромагнітного поля.

Границю міцності при стисканні визначали за ГОСТ 4651-82. Зразки у формі циліндрів діаметром  $10 \pm 0,5$  і висотою 15 мм піддавали стиску з швидкістю наближення площадок 2 мм/хв.

**Результати досліджень.** Під впливом електромагнітного поля підвищується рухливість сегментів макромолекул епоксидної смоли, в результаті чого зростає температура композиції та швидкість реакції утворення хімічних зв'язків. При цьому виникає необхідність дослідження впливу потужності електромагнітного випромінювання та тривалості витримки на процеси структурування епоксиполімерних композицій, оскільки дані фактори спричиняють інтенсивне нагрівання композиції. З ростом температури відбувається виділення летких речовин, які призводять до формування пористої структури (рис. 1) з низькими механічними характеристиками.

В результаті аналізу експериментальних даних встановлено, що за тривалості обробки менше 20 с суттєвих змін в процесі структурування епоксидних композицій не відбувається, в результаті чого епоксиполімер містить значну кількість вологи і залишається непрозорим (рис. 2). За тривалості обробки більше 40 с композиція починає інтенсивно нагріватися, тому оптимальний діапазон тривалості обробки в електромагнітному полі знаходиться в межах 20–40 с за потужності випромінювання 125 Вт.



Рис. 1. Загальний вигляд спіненого епоксиполімеру

За тривалості витримки композиції 20 с границя міцності при стисканні епоксиполімерів становить 12,3 МПа, однак дана характеристика зростає у 2,8 рази у випадку застосування витримки в електромагнітному полі протягом 30 с (рис. 3). Це пов'язано з тим, що система отримала необхідну кількість енергії, яка не спричиняє перехід у твердий стан, однак підвищується рухливість сегментів макромолекул, в результаті чого створюються сприятливі умови для формування сітчастої структури епоксиполімеру. Витримка композиції протягом 40 с призводить до акумулювання теплової енергії, яка через низьку теплопровідність створює градієнт температур і спричиняє нерівномірне структурування.

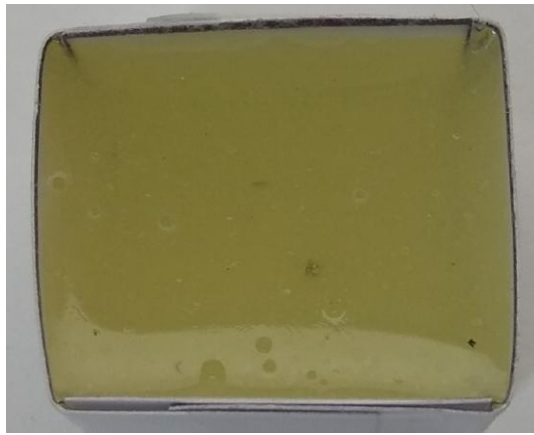


Рис. 2. Загальний вигляд зразка епоксиполімеру за тривалості обробки 10 с та потужності випромінювання 125 Вт

У випадку збільшення потужності випромінювання до 250 Вт відбувається інтенсивне виділення теплової енергії, яка призводить до локального структурування протягом 20 с, в результаті чого межа міцності при стисканні знижується на 30 – 35 % порівняно з обробкою за потужності 125 Вт. Із збільшенням тривалості витримки за потужності випромінювання 250 Вт відбувається різке зниження даної характеристики, оскільки крім локального структурування відбувається виділення летких речовин, які формують пористу структуру та знижують конструкційну міцність епоксиполімеру.

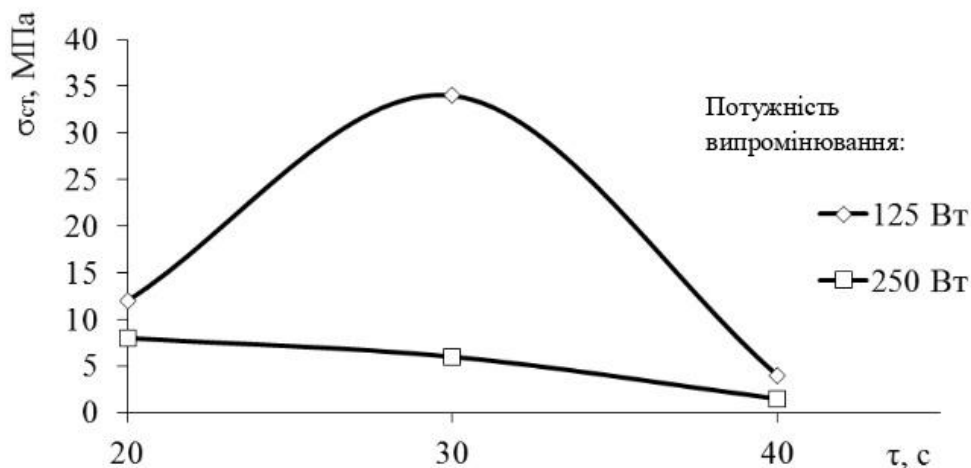


Рис. 3. Вплив тривалості витримки композиції в електромагнітному полі на межу міцності при стисканні епоксиполімерів

Очевидно, що обробка в електромагнітному полі не призводить до переходу композиції з в'язкого стану у твердий за малої витримки, а підвищення тривалості спричиняє формування дефектного стану. Тому необхідно забезпечити дисипацію теплової енергії, яка відбувається під час перерви, коли відсутній вплив електромагнітного поля. При цьому необхідно визначити тривалість перерви, під час якої відбувається охолодження системи.

Експериментально встановлено, що тривалість обробки композиції протягом 20 с не забезпечує високі значення межі міцності при стисканні за тривалості охолодження 5 хв, оскільки значна тривалість охолодження призводить до втрати теплової енергії, необхідної для ініціювання процесів структурування (рис. 4). Підвищення даної характеристики у 4,5 рази в результаті охолодження протягом 2 хв вказує на наявність в системі необхідного запасу акумульованої теплової енергії.

Однак за тривалості витримки в електромагнітному полі 30 с та 40 с кращі результати отримано у випадку охолодження 5 хв порівняно з тривалістю охолодження 2 хв, що вказує на потребу системи в рівномірному розподіленні реакційноздатних груп, які виступають центрами утворення хімічних зв'язків в епоксиполімерній системі.

Експериментально встановлено, що найвище значення межі міцності при стисканні мають епоксиполімери після обробки протягом 30 с (34 МПа), однак дана характеристика зростає на 34-

37 % у випадку проведення наступної обробки з охолодженням тривалістю 5 хв. Таким чином, ефективність структуривання підвищується за умови двоетапної обробки з перервою, яка забезпечує дисипацію теплової енергії. При цьому необхідно визначити оптимальну тривалість обробки на другому етапі обробки композиції в електромагнітному полі, оскільки встановлено, що епоксиполімерна система у в'язкому стані є досить чутливою до впливу енергетичного поля.

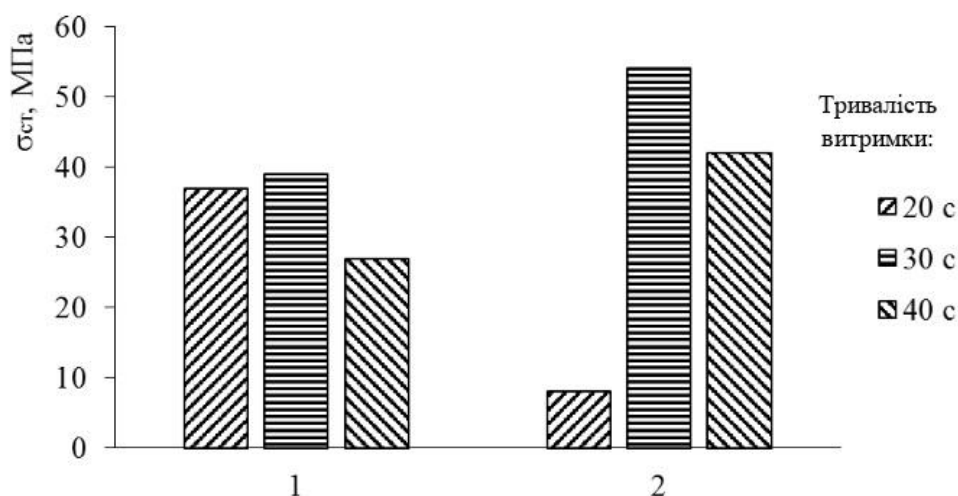


Рис. 4. Залежність межі міцності при стисканні епоксиполімерів структурованих в електромагнітному полі від тривалості охолодження: 1 – 2 хв; 2 – 5 хв

Встановлено, що оптимальна тривалість обробки в електромагнітному полі на другому етапі складає 30 с, що забезпечує підвищення межі міцності при стисканні до 54 МПа порівняно з тривалістю 40 с та 50 с (рис. 5), оскільки за даних умов відбувається зниження межі міцності на 9,2 % та 57 % відповідно.

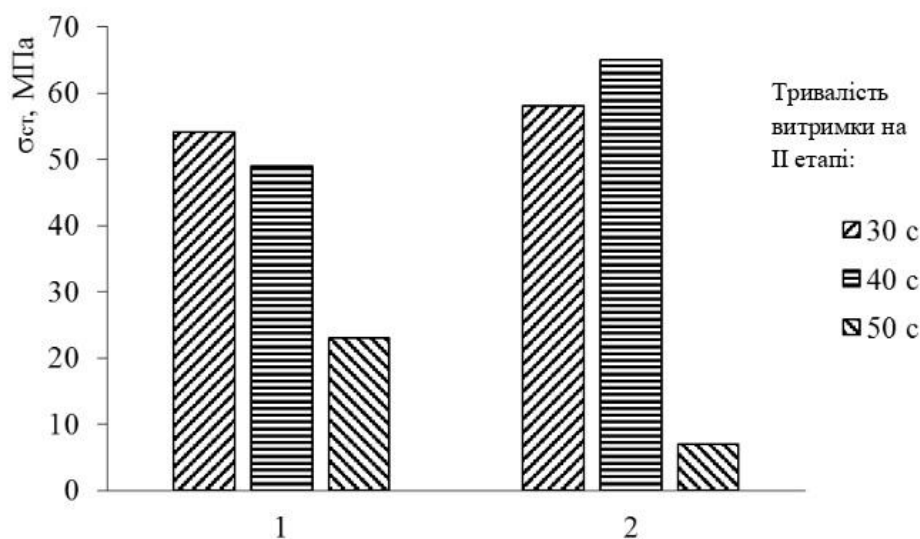


Рис. 5. Залежність межі міцності при стисканні епоксиполімерів структурованих в електромагнітному полі від кількості етапів: 1 – II етапи; 2 – III етапи

Очевидно, що на другому етапі структуривання система поводить себе аналогічно як на першому етапі, оскільки композиція знаходиться у в'язкотекучому стані. Тому значне підвищення тривалості обробки на другому етапі спричиняє підвищення теплової енергії, надлишок якої негативно позначається на формуванні напруженого стану.

Оскільки перехід композиції у твердий стан за два етапи не відбувається, тому доцільним є проведення третього етапу електромагнітної обробки з тривалістю обробки на першому етапі 30 с та витримкою під час охолодження 5 хв. Найвище значення межі міцності при стисканні (65 МПа) мають епоксиполімери структуровані за циклічним режимом електромагнітної обробки (30 с + 40 с + 30 с), коли тривалість обробки на другому етапі є вищою, а на третьому – нижчою. Очевидно, що тривалість на другому етапі 30 с не забезпечує генерування достатньої енергії для

протікання процесу структурування, а тривалість 50 с призводить до виділення надлишкової кількості теплової енергії.

Очевидно, що тривалість четвертого етапу електромагнітної обробки повинна складати 40 с, в результаті чого відбувається перехід епоксидної композиції у твердий стан з формуванням рівноважної структури полімеру з мінімальною кількістю дефектів (рис. 6) у вигляді повітряних або газових включень.

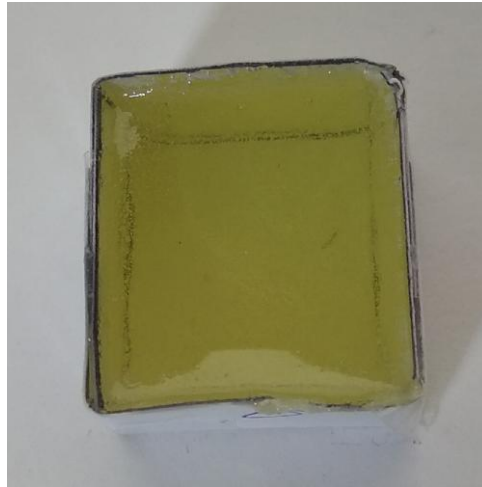


Рис. 6. Загальний вигляд зразка епоксиолімеру структурованого за циклічним режимом електромагнітної обробки

Експериментально встановлено, що дана циклічна електромагнітна обробка не забезпечує завершеність процесів структурування, оскільки значення механічних характеристик та вмісту гель-фракції залишаються на низькому рівні, тому необхідно проводити додаткову електромагнітну або термічну обробку для утворення вторинних хімічних зв'язків між реакційноздатними групами компонентів епоксидного полімера.

**Висновок.** Встановлено, що тривалість електромагнітної обробки на першому етапі повинна складати 30 с, що забезпечує генерацію оптимальної кількості теплової енергії, з наступним охолодженням протягом 5 хв, під час якого відбувається дисипація теплової енергії та рівномірне структурування епоксиолімерної системи.

Встановлено, що тривалість охолодження (5 хв) є високою у випадку обробки тривалістю 20 с, оскільки відбувається втрата теплової енергії, яка є необхідною для ініціювання процесів структурування, що призводить до гальмування структуроутворюючих процесів.

Застосування циклічного режиму електромагнітної обробки забезпечує формування твердої фази епоксиолімерів з невисоким ступенем структурування ( $G = 78,6\%$ ), який підвищується до  $88,2 - 88,7\%$  за рахунок наступної обробки у тепловому полі.

1. Чернин И.З., Смахов Ф.Н., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – Химия, 1982. – 232с.
2. Федоров В.В. Дослідження впливу природи наповнювачів на реологічні властивості епоксидних композицій / Федоров В.В., Білий Л.М. // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ. – 2006. – Випуск 17. – С.406-411.
3. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк, Є.М. Кальба. – Терноп. держ. техн. ун-т ім. І.Пулюя. – Т.: Збруч, 2005. – 182 с.
4. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями: монографія / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, І.Г. Добротвор. – Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – Т.: Збруч, 2008. – 208 С. 3-5.
5. Полімерні композиційні матеріали в ракетно -космічній техніці : підручник / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399 с.
6. Букетов А. Дослідження властивостей модифікованих епоксикомпозитів під впливом теплового поля // Вісник ТДТУ. – 2004. – Т.9, №3. – С. 34-38.
7. Демченко В.Л., Віленський В.О. Вплив магнітного та електричного полів на структуру і властивості наповнених полімерів // Полімерний журнал. – 2009. – С. 97-110.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019