

В.В. Карташов

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя
**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОНАПОВНЕНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ
 СФОРМОВАНИХ У ЗМІННОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

В роботі досліджено вплив змінного магнітного поля на ударну в'язкість епоксикомпозитів. Обробку композицій проводили за допомогою розробленого пристрою змінним магнітним полем частотою $\nu = 0,02...200$ кГц при вмісті ферромагнітного наповнювача $q = 0...150$ мас.ч. на 100 мас.ч. зв'язувача. Методом математичного планування експерименту досліджено ударну в'язкість в залежності від режимів магнітної обробки. Встановлено, що для забезпечення високих значень ударної в'язкості у епоксидне в'язуче необхідно вводити 25...35 мас.ч. фериту, та обробляти змінним магнітним полем частотою 100...200 кГц. Це пояснюється тим, що змінне магнітне поле викликає збільшення кількості активних центрів та орієнтування доменів макромолекул, що у свою чергу приводить до підвищення фізико-механічних властивостей матеріалу.

Ключові слова: епоксидний олігомер, поліетиленполіамін, композитний матеріал, дисперсний наповнювач, ударна в'язкість.

Рис. 5. Літ. 13.

В.В. Карташов

**ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСИОННОПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ
 СФОРМИРОВАННЫХ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

В работе исследовано влияние переменного магнитного поля на ударную вязкость эпоксикомпозитов. Обработку композиций проводили с помощью разработанного устройства переменным магнитным полем частотой $\nu = 0,02...200$ кГц при содержании ферромагнитного наполнителя $q = 0...150$ мас.ч. на 100 мас.ч. связующего. Методом математического планирования эксперимента исследовано ударную вязкость в зависимости от режимов магнитной обработки. Установлено, что для обеспечения высоких значений ударной вязкости в эпоксидное вязучее необходимо вводить 25...35 мас.ч. феррита, и обрабатывать переменным магнитным полем частотой 100...200 кГц. Это объясняется тем, что переменное магнитное поле вызывает увеличение количества активных центров и ориентирования доменов макромолекул, а это свою очередь приводит к повышению физико-механических свойств материала.

Ключевые слова: эпоксидный олигомер, полиэтиленполиамин, композитный материал, дисперсный наполнитель, ударная вязкость.

V.V. Kartashov

**THE RESEARCH OF EPOXYCOMPOSITES WHICH CONTAIN A DISPERSE FILLER
 AND FORMED IN ALTERNATING MAGNETIC FIELD**

The influence of alternating magnetic field on the impact strength of epoxycomposites was investigated. Treatment of the compositions was performed by developed device with an alternating magnetic field $\nu = 0,02...200$ kHz and a filler content of $q = 0...150$ mass parts of ferromagnetic. A regression equation to determine the impact strength by the method of mathematical planning of the experiment was found. Research has found that the use of ferrite in the range of 25÷35 mass parts per 100 mass parts of oligomer and processing by the alternating magnetic field by 100...200 kHz provides high rates of impact strength. Increasing of the physical and mechanical properties of the materials can be explained by the increasing of amount of active centres and orientation of the domains of the macromolecules as a result of the influence of alternating magnetic field.

Key words: epoxy oligomer, polyetylenpoliamin, composite material, disperse filler, impact strength.

Постановка проблеми. На даному етапі розвитку сучасна промисловість ставить широкий комплекс вимог до нових метало- енергозберігаючих технологій. Одним з основних напрямків вирішення цієї проблеми є застосування полімеркомпозитних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Використання таких матеріалів дозволяє збільшити термін експлуатації обладнання, зменшити собівартість ремонтних робіт та металовитрати виробництва. Актуальним є використання полімеркомпозитних матеріалів на основі епоксидних зв'язувачів з дисперсними та волокнистими наповнювачами. При цьому одним з основних завдань при розробленні таких матеріалів є забезпечення оптимальних умов фізико-хімічної взаємодії на межі поділу фаз «наповнювач – олігомерний зв'язувач» та оптимальних умов зшивання при формуванні виробу.

Суттєво підвищити фізико-механічні характеристики композитів дозволяє їх модифікація зовнішніми силовими полями. При цьому навколо наповнювача змінюються умови проходження процесів зшивання, що приводить до утворення матеріалу із зміненими властивостями. Застосування магнітного оброблення дозволяє провести впорядкування доменів, що є, фактично

макромолекулами, і забезпечує направлену зміну властивостей композиту та створити матеріали з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Саме тому використання магнітної модифікації для створення дисперснонаповнених епоксикомполімерів з комплексом покращених фізико-механічних характеристик є актуальним завданням сучасного матеріалознавства. У зв'язку з цим, важливою задачею є встановлення закономірностей впливу магнітної обробки на процеси структуроутворення при формуванні матеріалів, а також їхніх властивостей. Отже, перспективними з науково-практичної точки зору є нові методи модифікації епоксикомполімерів на етапі структуроутворення, оскільки дозволять направлено керувати комплексом фізико-механічних властивостей композитних матеріалів, що забезпечить збільшення сфери їх застосування та дозволить вирішити ряд практичних задач.

Метою роботи було дослідити композитні матеріали на основі епоксидних смол з дисперсним наповнювачем затверджених під впливом змінного магнітного поля для створення епоксикомполімерів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для регулювання основних властивостей КМ використовують фізичне та хімічне модифікування складових композицій [1]. У роботах авторів [2] встановлено, що наявність магнітного поля в процесі полімеризації реактопластів сприяє утворенню впорядкованих надмолекулярних структур. Це призводить до зміни фізико-механічних характеристик таких полімерів. Встановлено, що одним із основних чинників, що визначають вплив магнітного поля на властивості полімерів, є напруженість магнітного поля [3]. При цьому зміцнювальний ефект від магнітного оброблення залежить від режимів, котрі необхідно утримувати у певних оптимальних межах.

Відомо [4], що епоксидні полімери зазвичай є полярними діелектриками, основною властивістю яких є здатність до поляризації під впливом зовнішніх силових полів. Тобто полімери на основі епоксидного олігомера чутливі до впливу зовнішніх силових полів. В електричному полі в них може виникати дипольна або міграційна поляризація, а під впливом магнітного поля відбувається зміщення ділянок ланцюгів макромолекули вздовж напрямку напруженості поля. При наповненні епоксидної матриці феритовими частинками наповнювача, при достатній його концентрації, такі полімери здобувають феромагнітні властивості, і при внесенні в магнітне поле поведуть себе як феромагнетики. Відомо [5], що при внесенні феромагнітних матеріалів в магнітне поле, в залежності від напруженості магнітного поля, відбувається часткова, або повна орієнтація спінів магнітних атомів. При цьому, якщо поміняти напрям зовнішнього магнітного поля, зміниться і напрям магнітних моментів, тобто відбудеться перемагнічування.

Авторами [6] встановлено, що величина напруженості магнітного поля нелінійно впливає на характеристики оброблених епоксидних полімерів, зокрема на їх пружні властивості. Встановлено, що при затвердженні епоксидного полімера в магнітному полі, матеріал проявляє анізотропію як відносно пружних характеристик, так і відносно електричних. При цьому степінь орієнтації макромолекул зростає при збільшенні тривалості магнітного оброблення. Проте при різних значеннях напруженості магнітного поля макромолекули орієнтовані по різному відносно силових ліній поля. Це пояснюють тим, що геометрична форма молекулярних утворень залежить від напруженості магнітного поля. Оскільки напрям осей анізотропії такого матеріалу є складною функцією від напруженості, можна припустити, що магнітне оброблення впливає на кінетику зшивання композиту. А саме, при реакції полімеризації, утворення хімічних зв'язків поширюється в об'ємі композиції у вигляді фронту, для якого характерними є напрям поширення та швидкість, що залежать від зовнішніх умов.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при застосуванні магнітного оброблення спостерігали відмінність в просторовій орієнтації надмолекулярної організації [7, 8]. Тобто існує залежність густини зшивання сітки по відношенні до орієнтації силових ліній зовнішнього намагнічуючого поля.

Також у роботах авторів [9] показано, що у епоксидних полімерів, як у полярних діелектриків, мають місце процеси електронної, дипольної та міграційної поляризації. Тому під впливом магнітного поля відбувається зміщення ділянок ланцюгів макромолекул в напрямку силових ліній поля. Встановлено, що при зростанні температури середовища підвищується діелектрична проникність епоксидних полімерів. А при досягненні температури склування починає знижуватися.

Таким чином для регулювання експлуатаційних властивостей епоксидних композитів перспективним є застосування модифікації силовими полями, зокрема змінним магнітним та електричним полем. Такі способи обробки фізичними полями забезпечують не лише активацію

макромолекул матриці, а й дають змогу збільшити активність епоксидних композицій для кращої міжфазної взаємодії дисперсних частинок із макромолекулами зв'язувача. Крім того оброблення силовими полями сприяє впорядкуванню структури матеріалу, збільшує його густину, забезпечує суттєву зміну конфірмаційного набору макромолекул у поверхневих шарах. Це забезпечує покращення фізико-механічних характеристик матеріалу.

Методика дослідження. В якості в'язучого для полімерної матриці вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20, який зшивали низькотемпературним твердником поліетиленполіаміном (ПЕПА) при стехіометричному співвідношенні компонентів ЕД-20: ПЕПА 100:10 мас.ч., що забезпечує можливість формування матеріалу при кімнатних температурах. При формуванні епоксикомпозитів вводили дисперсні частки феромагнітної природи (ферит марки 1500НМ3) розміром 63 мкм.

Для дослідження впливу магнітного оброблення на властивості композитних матеріалів було розроблено пристрій для оброблення епоксидних композицій змінним магнітним полем [10]. Оброблення композицій здійснювали як до введення твердника, так і в процесі зшивання тривалістю 10...180 хв., так як експериментально виявлено, що саме у такому діапазоні часу вплив магнітної обробки є максимально ефективним. Встановлено [11], що подальше збільшення тривалості модифікування композицій не призводить до суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик композитів на епоксидній основі. Зразки досліджуваних епоксидних композицій розташовували в середині соленоїда вздовж його осі. Після розміщення зразка в соленоїда пристрою, коливальний контур пристрою налаштовували на резонанс по частоті за допомогою конденсаторів змінної ємності. Частоту змінного магнітного поля (ЗМП) створюваного робочим каскадом соленоїда задавали звуковим генератором ГЗ-33 в межах 20 Гц - 200 кГц. Індукцію магнітного поля задавали шляхом зміни кількості задіяних витків котушки соленоїда в межах 0,5 – 3,5 Тл. Наближені значення індукції магнітного поля вимірювали за допомогою датчика Хола. Роботу пристрою контролювали за допомогою осцилографа із каліброваною розгорткою типу С1-73, для під'єднання якого в соленоїді виконано контрольну обмотку.

Феромагнітний наповнювач вводили в межах від 0 до 150 мас. ч. та проводили затвердження композицій під впливом змінного магнітного поля. Отримані матеріали досліджували на ударну в'язкість по Шарпі згідно ГОСТ 4647-80 за допомогою маятникового копра.

Обробку та аналіз дослідних даних проводили за допомогою програмного забезпечення Statistica 6.0 шляхом застосування багатofакторного регресійного аналізу.

Обґрунтування отриманих результатів

У результаті аналізу дослідних даних було проведено дослідження кореляційного зв'язку між залежними та незалежними змінними. В якості незалежних змінних були представлені частота змінного магнітного поля (ν , кГц), магнітна індукція (B , Тл) та концентрація феромагнітного наповнювача (q , мас.ч.). В якості залежної змінної – ударна в'язкість (a , кДж/м²). Результати кореляційного аналізу залежних та незалежних змінних приведені на рис 1.

Кореляції (Ударна в'язкість)				
Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05000$				
N=360 (Построчное удаление ПД)				
Переменная	ν , кГц	B , Тл	q , мас.ч.	a , кДж/м ²
ν , кГц	1,00	-0,76	-0,00	0,27
B , Тл	-0,76	1,00	0,00	-0,39
q , мас.ч.	-0,00	0,00	1,00	-0,78
a , кДж/м ²	0,27	-0,39	-0,78	1,00

Рис. 1. Кореляційний аналіз впливу незалежних змінних на ударну в'язкість

Встановлено, що ударна в'язкість має помірну кореляцію з частотою ЗМП (ν , кГц), оскільки $0,25 < r/\leq 0,75$ і становить 0,27. Це вказує на те, що зростання частоти приводить до часткового зростання ударної в'язкості. Коефіцієнт кореляції магнітної індукції становить -0,39 (помірна залежність), що свідчить про те, що зростання індукції магнітного поля призводить до помірною зменшення ударної в'язкості. Вміст феромагнітного наповнювача має суттєвий вплив на ударну в'язкість ($r = -0,78 > 0,75$ – сильна кореляція). Від'ємне значення коефіцієнта кореляції свідчить про те, що збільшення вмісту феромагнітного наповнювача призводить до суттєвого зменшення ударної в'язкості. Графік залежності ударної в'язкості від вмісту феромагнітного наповнювача та частоти ЗМП приведений на рис. 2, а від вмісту наповнювача та індукції магнітного поля на рис. 3.

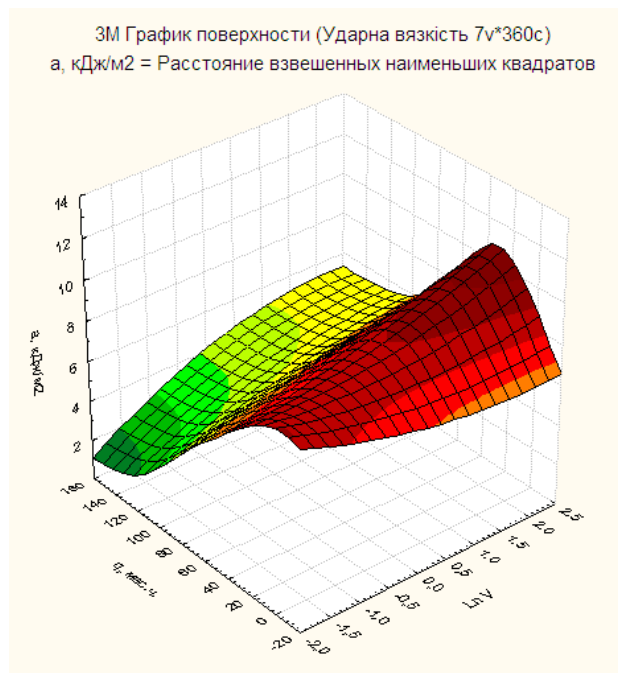


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості сформованих у ЗМП епоксикомпозитів від вмісту ферромагнітного наповнювача та частоти

Експериментально встановлено, що збільшення вмісту наповнювача веде до зменшення ударної в'язкості, а зростання частоти магнітного поля приводить до її зростання. При цьому введення ферромагнітних частинок в епоксидну композицію забезпечує зміну умов зшивання епоксидної матриці [12]. При обробці матеріалу змінним магнітним полем у процесі структуроутворення відбувається часткова орієнтація доменів макромолекул вздовж силових ліній поля. Наявність ферромагнітного наповнювача в композиті приводить до зростання магнітної індукції поля, що забезпечує підвищення орієнтаційного ефекту доменів. Зміна орієнтації ланцюгів макромолекул приводить до зміни фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, у тому числі і ударної в'язкості.

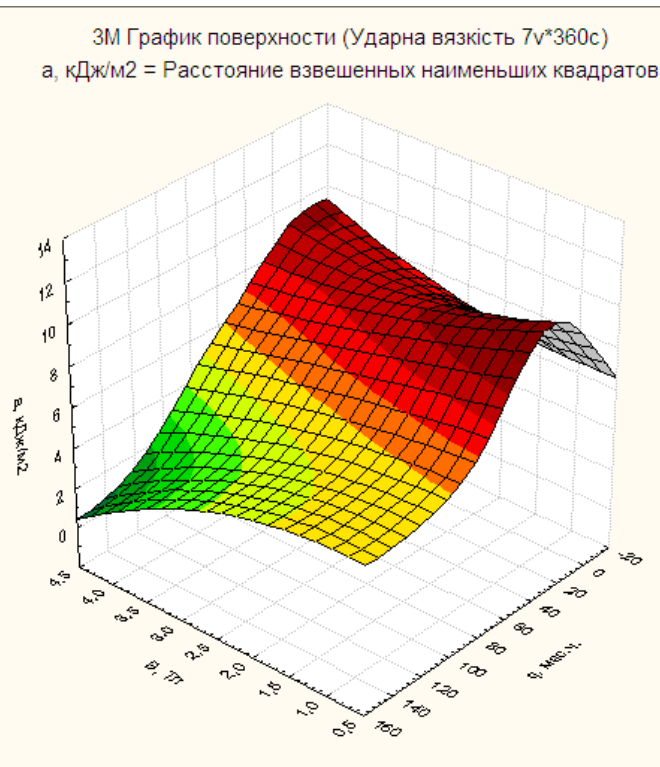


Рис. 3. Залежність ударної в'язкості сформованих у ЗМП епоксикомпозитів від вмісту ферромагнітного наповнювача та магнітної індукції

Більша міра орієнтації макромолекул, на нашу думку, збільшує фізико-механічні властивості розроблених матеріалів. Проте збільшення концентрації наповнювача, як показало дослідження концентрації ($q > 40$ мас.ч. фериту) погіршує значення ударної в'язкості. Це пов'язано з тим, що збільшення кількості дисперсних часток в олігомері створює надмірну орієнтацію доменів макромолекул внаслідок чого в процесі зшивання виникають високі значення залишкових напружень, оскільки система макромолекул не може приймати оптимальний, з точки зору залишкових напружень конфірмаційний набір, що характеризується мінімальним значенням внутрішньої енергії [13]. У результаті утворюється більш «рихлий» композитний матеріал, який володіє гіршими фізико-механічними характеристиками. При надмірно високому вмісті феромагнітних часток фізико-механічні властивості погіршуються за рахунок недостатньої змочуваності наповнювача олігомером, що додатково погіршує експлуатаційні характеристики матеріалу.

При збільшенні частоти ЗМП досліджувані характеристики зростали. Це пояснюють тим, що збільшення частоти магнітного поля дозволяє перевести епоксидну матрицю в активний стан, що покращує умови структуроутворення в матеріалі в цілому, а при наявності феромагнітного наповнювача забезпечує орієнтацію доменів макромолекул, що додатково покращує фізико-механічні характеристики. Проте змінне магнітне поле викликає у дисперсних частках феромагнітної природи появу вихрових струмів. Їхнє утворення приводить до виділення теплоти, тобто при високих концентраціях феромагнетика та високій частоті ЗМП відбувається значний нагрів композиту. Оскільки реакція зшивання епоксидного олігомера є екзотермічною, тобто з виділенням тепла, значний додатковий нагрів індукційними струмами є небажаним, поза як погіршується зшивання олігомера твердником.

При наявності ЗМП із деяким значенням магнітної індукції виникає орієнтація доменів макромолекул та частинок наповнювача. Це приводить до покращення фізико-механічних властивостей, а зокрема ударної в'язкості. Збільшення значення магнітної індукції погіршує міцність композиту у випадку зростання вмісту феромагнітних частинок наповнювача (рис. 3). Це пов'язано з тим, що поряд з позитивним впливом на композит внаслідок орієнтації доменів (макромолекул), високі значення магнітної індукції викликають появу індукційних струмів і нагрів композиту. Це, у свою чергу, приводить до погіршення зшивання олігомера твердником. Експериментально встановлено, що оптимальні значення індукції магнітного поля лежать в межах від $B = 0,5$ Тл до $B = 2,0$ Тл, при яких досягають високої степені орієнтації макромолекул при незначному нагріві композиції. Дана тенденція спостерігалася при вмісті феромагнітного наповнювача не більше $q = 40$ мас.ч. При вищій концентрації феромагнетика суттєво погіршуються умови зшивання внаслідок інтенсивнішого нагріву композиції вихровими струмами, можливе спізнення оброблюваного матеріалу.

Підсумовуючи викладене вище, слід зауважити, що вплив ЗМП на експлуатаційні характеристики композитних матеріалів наповнених феромагнетиками носить позитивний характер. Необхідно підбирати такі технологічні режими формування, щоб забезпечувалась орієнтація макромолекул при мінімальному нагріві композиції. Надалі у результаті обробки дослідних даних було проведено поліноміальну регресію (рис. 4).

R= .93944658 R2= .88255988 Скорректир. R2= .87988318
F(8,351)=329,72 p<0.0000 Станд. ошибка оценки: .76856

N=360	БЕТА	Стд. Ош. БЕТА	В	Стд. Ош. В	t(351)	p-уров.
Св.член			7,764947	0,151924	51,11070	0,000000
Ln V	0,7110	0,073070	1,113385	0,114419	9,73078	0,000000
q, мас.ч.	2,4137	0,257098	0,131122	0,013966	9,38839	0,000000
V2**2	0,0733	0,107578	0,086560	0,126978	0,68169	0,495882
V2**3	-0,4395	0,114548	-0,171806	0,044782	-3,83648	0,000148
V2**4	0,0833	0,149542	0,017593	0,031576	0,55716	0,577775
V4**2	-10,3318	1,132321	-0,003893	0,000427	-9,12445	0,000000
V4**3	11,1150	1,733815	0,000029	0,000005	6,41072	0,000000
V4**4	-3,8460	0,858926	0,000000	0,000000	-4,47767	0,000010

Рис. 4. Результати поліноміальної регресії дослідних даних

Рівняння регресії має вигляд:

$$a(\ln v, q) = 7,764947 + 1,113385 \cdot \ln v + 0,131122 \cdot q - 0,171806 \cdot \ln v^3 - 0,0033893 \cdot q^2 + 0,000029 \cdot q^3.$$

Отримане рівняння дозволяє розрахувати значення ударної в'язкості при заданій частоті ЗМП та вмісті феромагнітного дисперсного наповнювача. Аналіз залишків показав, що похибка

регресійної моделі при розрахунку ударної в'язкості не перевищує 6,9%. Достовірність рівняння регресії з експериментальними результатами оцінювали по їх різниці у абсолютних величинах (залишках). Результати аналізу залишків приведені на рис. 5.

Набл. No.	Зависимая перемен.: а, кДж/м ²								
	Наблюд. Значение	Предск. Значение	Остатки	Станд. предск.	Станд. Остатки	Стд. Ош. предск.	Махалан. расст.	Удален. остатки	Кука расст.
339	6,90000	7,70547	-0,80547	0,07876	-1,04802	0,114270	6,93873	-0,82368	0,002821
340	7,60000	7,70547	-0,10547	0,07876	-0,13723	0,114270	6,93873	-0,10786	0,000048
341	6,40000	6,96423	-0,56423	-0,27704	-0,73413	0,114201	6,92907	-0,57696	0,001383
342	6,90000	6,96423	-0,06423	-0,27704	-0,08357	0,114201	6,92907	-0,06568	0,000018
343	6,50000	6,96423	-0,46423	-0,27704	-0,60402	0,114201	6,92907	-0,47471	0,000936
344	5,80000	6,96423	-1,16423	-0,27704	-1,51481	0,114201	6,92907	-1,19051	0,005886
345	5,70000	6,31691	-0,61691	-0,58776	-0,80268	0,114399	6,95658	-0,63089	0,001659
346	5,20000	6,31691	-1,11691	-0,58776	-1,45324	0,114399	6,95658	-1,14222	0,005437
347	5,30000	6,31691	-1,01691	-0,58776	-1,32313	0,114399	6,95658	-1,03995	0,004507
348	6,60000	6,31691	0,28309	-0,58776	0,36833	0,114399	6,95658	0,28950	0,000349
349	5,50000	5,79676	-0,29675	-0,83744	-0,38612	0,122769	8,16317	-0,30453	0,000445
350	4,80000	5,79676	-0,99675	-0,83744	-1,29690	0,122769	8,16317	-1,02285	0,005022
351	5,50000	5,79676	-0,29675	-0,83744	-0,38612	0,122769	8,16317	-0,30453	0,000445
352	6,20000	5,79676	0,40325	-0,83744	0,52467	0,122769	8,16317	0,41380	0,000822
353	5,30000	5,18633	0,11367	-1,13045	0,14790	0,160238	14,60789	0,11884	0,000115
354	6,00000	5,18633	0,81367	-1,13045	1,05869	0,160238	14,60789	0,85065	0,005917
355	5,60000	5,18633	0,41367	-1,13045	0,53824	0,160238	14,60789	0,43247	0,001529
356	4,30000	5,18633	-0,88633	-1,13045	-1,15322	0,160238	14,60789	-0,92661	0,007020
357	5,00000	5,08350	-0,08350	-1,17981	-0,10865	0,189057	20,72573	-0,08888	0,000090
358	4,00000	5,08350	-1,08350	-1,17981	-1,40978	0,189057	20,72573	-1,15329	0,015139
359	4,90000	5,08350	-0,18350	-1,17981	-0,23876	0,189057	20,72573	-0,19532	0,000434
360	6,10000	5,08350	1,01650	-1,17981	1,32259	0,189057	20,72573	1,08197	0,013324
Минимум	1,90000	2,42460	-0,52460	-2,18516	-2,23554	0,102369	5,37182	-1,75141	0,000000
Максим.	12,10000	11,55170	0,54830	1,40826	2,71497	0,189057	20,72573	2,17539	0,041773
Среднее	7,54139	7,54139	0,00000	-0,00000	0,00000	0,119245	7,97778	0,00034	0,003273
Медиана	8,00000	8,06654	-0,08980	0,25208	-0,11683	0,108970	6,22061	-0,09349	0,001163

Рис. 5. Результати аналізу залишків ударної в'язкості епоксикомполімерів

Підсумовуючи вище сказане можна стверджувати, що вплив магнітної обробки при зшиванні епоксикомполімерів дозволяє підвищити значення ударної в'язкості при оптимальній концентрації дисперсного феромагнітного наповнювача $q = 25 \dots 35$ мас.ч., та частоті ЗМП $\nu = 100 \dots 200$ кГц.

Висновки. Вплив обробки змінним магнітним полем епоксидних композицій в процесі зшивання на значення ударної в'язкості носить позитивний характер. Зміцнюючого ефекту досягали при оптимальних значеннях вмісту фериту ($q = 25 \dots 35$ мас.ч. та частоти магнітного поля $100 \dots 200$ кГц). При більших значеннях вказаних параметрів збільшується нагрів композиції, що призводить до погіршення умов зшивання. При менших значеннях досліджуваних факторів обробка змінним магнітним полем не суттєво впливає на фізико-механічні властивості через низьке значення ступені орієнтації компонентів композиції у процесі формування матеріалу. В подальшому планується дослідити вплив обробки змінним магнітним полем на інші фізико-механічні характеристики епоксикомполімерів.

1. Стухляк П.Д. Дослідження механізму впливу технології формування на властивості епоксидних композитів / Стухляк П.Д., Букетов В.А., Левицький В.В. // Вісник ТДТУ. — Тернопіль. — 2004. — №2. — С. 9-17.
2. Молчанов Ю. М. Структурные изменения полимерных материалов в магнитном поле / Ю. М. Молчанов, Э. Р. Кисис, Ю. П. Родин // Механика полимеров. — 1973. — № 4. — С. 737-761.
3. Шут М. І. Фізико-механічні властивості епоксидних полімерів, затверджених у постійному магнітному полі / М. І. Шут, Н. М. Зазимко, Т. Г. Січкара // Збірник праць 2-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Композиційні матеріали». — К.: НТУУ «КПІ». — 2001. — С. 131.
4. Тугов И.И. Химия и физика полимеров / И.И. Тугов, Г.И. Кострыкина. — М.: Химия, 1989. — 224 с.
5. Вонсовский С.В. Магнетизм / Вонсовский С.В. — М.: Наука, 1984. — 214 с.
6. Вундерлих Б. Физика макромолекул / Вундерлих Б. — М.: Мир, 1978. — 214 с.
7. Малежик П. М. Вплив магнітного поля на оптико-механічні властивості епоксидно-амінних полімерів / П. М. Малежик, М. І. Шут, Т. Г. Січкара, М. О. Рокицький // Полімерний журнал. — 2012. — Т. 34, № 2. — С. 161-167.
8. Зазимко Н. М. Вплив постійного магнітного поля на особливості тверднення епоксидних полімерів / Н. М. Зазимко, М. І. Шут, Т. Г. Січкара, П. М. Малежик // Фізика конденсованих високомолекулярних систем: Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. — Рівне, 2007. — Вип. 12. — С. 86-89.
9. Липатов Ю.С. Исследование молекулярных движений в системе эпоксидная смола-пластификатор / Липатов Ю.С., Фабуляк Ф.Г., Овченникова Г.П. // Механика полимеров. — 1973. — № 2. — С. 374.

10. Пат. 62717 Україна, МПК В 03 В 13/04. Пристрій для обробки полімерних композицій змінним магнітним полем / Стухляк П.Д., Карташов В.В, Андрієвський В.В.; заявник та патентовласник Тернопільський нац. техн. універс. – № u 2011 01904; заявл. 18.02.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17.
11. Стухляк П. Дослідження адгезійної міцності та залишкових напружень епоксикомпозитних матеріалів від обробки змінним магнітним полем низької частоти / П. Стухляк, В. Карташов // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Том 16. № 1. – С. 50-56.
12. Привалко В.П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В.П. Привалко. – Л. : Химия, 1986. – 314 с.
13. Манько Т. А. Структурные исследования эпоксидных полимеров, отвержденных в постоянном магнитном поле / Т. А. Манько, А. Н. Кваша, А. В. Соловьев и др. // Механика композитных материалов. – 1984. – № 4. – С. 589-592.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2014.