

## ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ, ОБРОБЛЕНИХ ЗМІННИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ НИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ

П.Д. Стухляк, В.В. Карташов

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя;  
46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, тел. (0352) 25–88–51; e-mail: Uncletafuk@i.ua

*Досліджено вплив змінного магнітного поля низької частоти на ударну в'язкість, теплостійкість, модуль пружності та руйнівне напруження при згинанні зразків з епоксидної матриці та полімерної композиції, що містить ферромагнітний наповнювач. Визначено оптимальні режими магнітної обробки для отримання матеріалу із заданими властивостями*

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

*Исследовано влияние переменного магнитного поля низкой частоты на ударную вязкость, теплостойкость, модуль упругости и разрушающее напряжение при изгибе образцов из эпоксидной матрицы и полимерной композиции, содержащей ферромагнитный наполнитель. Определены оптимальные режимы магнитной обработки для получения материала с заданными свойствами*

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

*The article deals with the influence of low-frequency alternating magnetic field on the impact strength, heat resistance, elastic modulus and breaking stress during bending sample of epoxy matrix and polymer composition, including ferromagnetic filler. Optimal regimes for magnetic handling used to get materials with desired properties are determined*

Keywords: epoxy oligomer, polyethylenpoliamin, composite material, thin filler, impact strength

### Постановка проблеми

Композиційні матеріали (КМ) дедалі частіше використовують у всіх галузях промисловості України для суттєвого підвищення надійності обладнання та устаткування, а також для збільшення терміну служби та міжремонтного періоду при експлуатації деталей різноманітних механізмів та машин. Перспективним у цьому напрямку є використання композиційних матеріалів на основі епоксидного зв'язувача, які забезпечують необхідний комплекс фізико-механічних властивостей, корозійну- та зносостійкість, а також високу ремонтоздатність за рахунок неодноразового відновлення робочих поверхонь деталей композитами. Однак на теперішній час вимоги до захисних покриттів зростають, і рівень розробок епоксидних композитів вже не повністю задовольняє вимоги, що ставляться до них сучасною промисловістю. Для підвищення експлуатаційних характеристик КМ важливим є розвиток нових технологій їх формування, до котрих відносять методи модифікування самих композицій або їх складових зовнішніми енергетичними полями [1]. Перспективним у цьому напрямку є дослідження впливу на експлуатаційні характеристики КМ змінного магнітного поля низької частоти.

### Огляд останніх досліджень і публікацій

Для регулювання структури полімер композитних покриттів з метою покращення їх фізико-механічних характеристик та експлуатаційних властивостей, в матрицю вводять наповнювачі різної фізичної природи та здійснюють обробку композицій зовнішніми фізичними полями. В праці [2] при вивченні впливу зовнішніх фізичних полів фізико-механічні властивості захисних полімер композитних покриттів, автори роблять висновок, що оброблення змінним магнітним полем дає змогу покращувати адгезійну міцність, міцність при розтягу, ударну в'язкість, зносостійкість композитів на основі епоксидних смол. Причому вплив магнітного поля є більш істотний на композити на основі епоксидного полімеру та ферромагнітно наповнювача.

Однак, на нашу думку, не достатньо уваги приділено питанням дослідженню впливу на експлуатаційні характеристики композитних матеріалів обробки композицій змінним магнітним полем низької частоти (< 1 МГц).

**Мета роботи** – дослідити вплив змінного магнітного поля низької частоти (0,01...1000 кГц) на фізико-механічні властивості композитних матеріалів.

### Матеріали та методика випробувань

Як полімерну матрицю використовували епоксидний олігомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), для зшивання — низькотемпературний твердник поліетиленполіамін (ТУ 6-05-241-202-78). Наповнювач – ферит марки 1500НМЗ дисперсністю 63 μm.

З метою підвищення досліджуваних характеристик був вибраний епоксидний композит, наповнений феритом марки 1500НМЗ із вмістом у 30 мас.ч. на 100 мас.ч. ЕД-20 (тут і далі

по тексту концентрація наповнювача наведена у масових частках на 100 мас.ч. зв'язувача). Попередніми експериментальними дослідженнями встановлено, що така концентрація є оптимальною для забезпечення високих фізико-механічних характеристик [3].

Для дослідження впливу магнітного поля на фізико-механічні властивості КМ та покриттів на їх основі, спроектовано та виготовлено пристрій [4], котрим обробляли компоненти олігомерного зв'язувача і епоксидних композицій з різним вмістом дисперсного наповнювача зовнішнім магнітним полем. Оброблення композицій здійснювали протягом 10...60 хв, так як експериментально виявлено, що саме у такому проміжку часу ступінь зшивання зв'язувача у ЗПШ є максимально ефективним.

Частоту змінного магнітного поля створюваного робочим каскадом соленоїда задавали звуковим генератором ГЗ-33 в межах 20 Гц-200 кГц. Магнітну індукцію визначали осцилографом С1-73 з каліброваною розгорткою (рис.1). Індукція магнітного поля при цьому становила 675 Тл – 0,35 Тл відповідно.



Рисунок 1 – Осцилограма режиму оброблення змінним магнітним полем при частоті 20 кГц

Після гідродинамічного суміщення компонентів та обробки змінним магнітним полем низької частоти зразки витримували протягом 36 год за нормальних умов, після чого піддавали термообробці при  $T=393\pm 2K$  протягом 2 год. Далі зразки витримували за нормальних умов протягом 60 год, відтак проводили випробування.

У якості оцінки впливу зовнішніх фізичних полів на фізико-механічні властивості полімеркомпозитних матеріалів вибрано ударну в'язкість, модуль пружності, руйнівне напруження при згинанні та теплостійкість. Руйнівне напруження і модуль пружності композитів при згинанні визначали згідно ГОСТ 4648-71 та ГОСТ 9550-81 відповідно. Теплостійкість (за Мартенсом) полімеркомпозиційних матеріалів визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Ударну в'язкість досліджували за допомогою маятнікового копра (ГОСТ 4765-73). Шкала вимірюваного приладу відградуєвана так, що нуль знаходиться внизу, а максимальне значення відповідає висоті підйому маятника після руйнування зразка. За відомого кута підйому шкала вимірювального приладу фіксує робочий кут

проходження маятника після руйнування зразка, розміри якого становили 60x10x10 мм згідно вказаного стандарту.

### Обговорення результатів дослідження

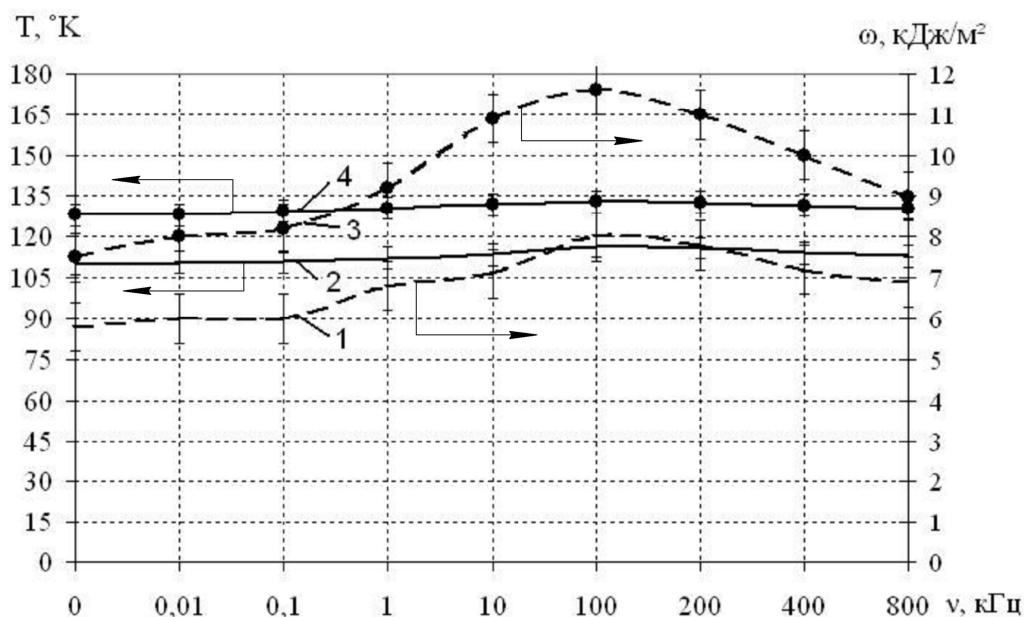
Відомо, що обробка зовнішніми енергетичними полями, а саме високочастотним магнітним полем, покращує фізико-механічні та адгезійні властивості полімеркомпозитних матеріалів [5]. Встановлено, що обробка композицій у змінному електромагнітному полі невеликої частоти (до 20 МГц) суттєво не впливає на адгезійну міцність полімерних захисних покриттів. Збільшення частоти високочастотного електромагнітного поля із 20 до 60 МГц дозволяє підвищити адгезійну міцність на 5...10 %, при цьому максимального значення досягали при обробці матеріалу частотою 40 МГц. Подальше збільшення частоти призводить до зниження адгезійно-міцнісних характеристик, що пояснюють збільшенням залишкових напружень внаслідок зростання температури у процесі обробки [6].

Тому розроблено пристрій для обробки полімерних композицій змінним магнітним полем зі збільшеним діапазоном частот і підвищеною точністю її задання дозволяє здійснювати оброблення зразків за незначного їх нагрівання [4]. Температура у цьому випадку знаходиться у межах  $T=318...323 K$ . Пристрій забезпечує можливість сконцентрувати магнітне поле на потрібній ділянці (потрібному об'ємі зразка полімерної композиції), що призводить до покращення міцнісних характеристик полімеркомпозитного покриття, обробленого змінним електромагнітним полем частотою лише 20 кГц.

Результати експериментальних досліджень на фізико-механічні властивості графічно представлені на рис. 2 та рис. 3.

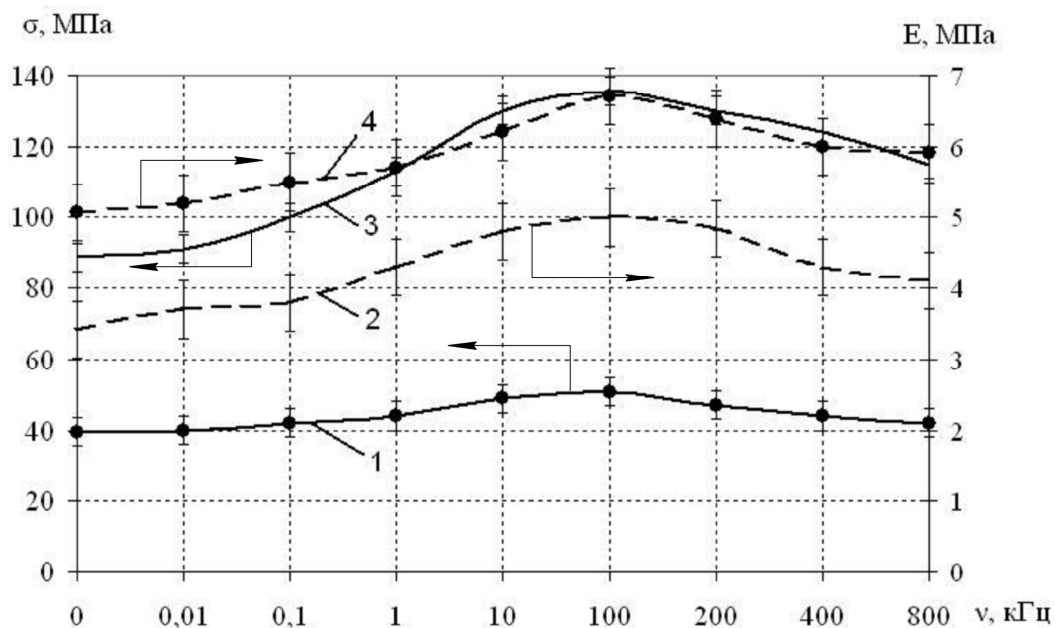
При обробці змінним магнітним полем частотою 20...300 кГц спостерігали підвищення всіх вищезазначених фізико-механічних характеристик епоксикомпозитного матеріалу. Зокрема ударної в'язкості на 38 % для матриці та 55 % – для композиту з феритовим наповнювачем, теплостійкості на 4 % та 5,5 % відповідно (рис. 2), модуля пружності – на 46 % та 32 %, руйнівного напруження при згині – на 29 % та 60 % (рис. 3).

Як видно із результатів експериментальних досліджень, введення в епоксидну матрицю дрібнодисперсного наповнювача марки ферит 1500НМЗ сприяє підвищенню міцнісних характеристик композиту внаслідок покращення умов полімеризації. На поверхні частинки дисперсного наповнювача є активні центри, що при формуванні матеріалу покращують процеси структуроутворення, чим досягли збільшення кількості зв'язків між в'язучим та поверхнею дисперсної сполуки. Цим забезпечується зменшення молекулярної рухливості в проміжних граничних шарах, і, як наслідок, збільшується ступінь зшивання матеріалу зв'язувача [7].



1 і 2 – криві залежності для епоксидної матриці;  
 3 і 4 – криві залежності для композиції з феритовим наповнювачем  
 Штриховою лінією позначені криві параметрів ударної в'язкості,  
 суцільною лінією позначені криві параметрів теплостійкості

**Рисунок 2 – Залежність теплостійкості та ударної в'язкості від частоти змінного магнітного поля**

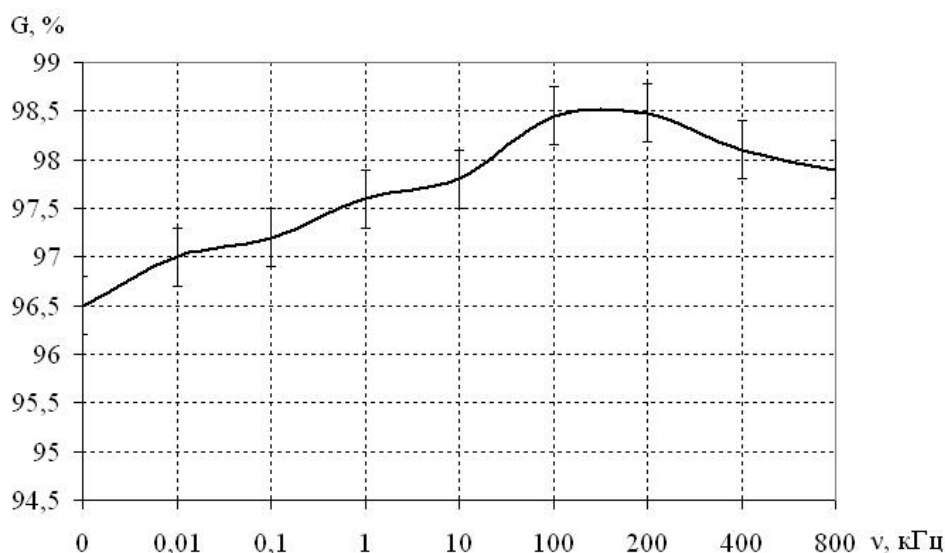


1 і 4 – криві залежності для епоксидної матриці  
 2 і 3 – криві залежності для композиції з феритовим наповнювачем  
 Штриховою лінією позначені криві параметрів модуля пружності,  
 суцільною лінією позначені криві параметрів руйнівного напруження при згині

**Рисунок 3 – Залежність руйнівного напруження при згині та модуля пружності від частоти змінного магнітного поля**

Встановлено, що епоксидна композиція з феритовим наповнювачем є більш чутливою до впливу обробки змінним магнітним полем, порівняно із епоксидною матрицею. Це пояснюють тим, що при введенні дрібнодисперсного наповнювача в епоксидну матрицю має місце

нерівномірність розподілу частинок наповнювача у полімерній композиції через високу в'язкість олігомера. А обробка композиції змінним магнітним полем покращує суміщення компонентів та сприяє рівномірному розподілу в об'ємі композиції завдяки орієнтації та впо-



**Рисунок 4 – Залежність вмісту гель-фракції у зв'язувачі з феритовим наповнювачем від частоти змінного магнітного поля**

рядкуванню феромагнітних частинок наповнювача вздовж силових ліній напруженості магнітного поля [8]. Цим досягають підвищення досліджуваних характеристик матеріалу.

Результатами експериментальних досліджень встановлено, що при частоті вище 300 кГц спостерігається поступове зниження усіх когезійних характеристик композиційного матеріалу (рис. 1, 2), що можна пояснити зниженням індукції магнітного поля, створюваного соленоїдом пристроєм. Відомо, що при обробці змінним магнітним полем композицій з феритовим наповнювачем зростає напруженість магнітного поля. У цьому випадку сама оброблювана композиція виконує роль феритового осердя трансформатора. Це створює просторову орієнтацію та впорядкування ланцюгів макромолекул полімерів вздовж силових ліній напруженості магнітного поля, і спричинює формування рівномірної структури полімер композиту та активнішу взаємодію матриці з дисперсними частинками наповнювача. Збільшується об'єм матеріалу, що знаходиться у стані поверхневих шарів. Спостерігали зростання жорсткості системи і підвищення досліджуваних характеристик матеріалу [9].

Проте, попри зростання напруженості, покращення фізико-механічних характеристик феронаповнених композицій в порівнянні з епоксидною матрицею не значне. Тому можна стверджувати, що основною причиною покращення вищезгаданих фізико-механічних властивостей є підвищення ступеня зшивання матеріалу (рис. 4). Для перевірки цього твердження, було проведено ряд експериментальних досліджень на встановлення залежності вмісту гель-фракції у зв'язувачі від частоти змінного магнітного поля, яким обробляли епоксидну композицію (рис. 4).

Встановлено, що із підвищенням частоти змінного магнітного поля вміст гель-фракції у матеріалі зростає. Коли частота магнітного поля досягає величини 150-300 кГц, вміст гель-

фракції у матеріалі виходить на постійне значення. З подальшим підвищенням частоти понад 300 кГц, спостерігали спад вмісту гель-фракції у матеріалі, що можна пояснити зниженням напруженості магнітного поля при високих частотах обробки. Напруженість магнітного поля розраховували за магнітною індукцією, величину якої задавали пристроєм.

На другому етапі проводили дослідження впливу індукції змінного магнітного поля, створюваного соленоїдом пристроєм, на фізико-механічні характеристики композиційного матеріалу, на прикладі ударної в'язкості (рис. 5).

Встановлено, що із зростанням магнітної індукції настає поступове підвищення ударної в'язкості, у зв'язку з тим, що магнітна індукція є основною силовою характеристикою магнітного поля, і зі збільшенням її абсолютної величини пришвидшується просторова орієнтація та впорядкування ланцюгів макромолекул полімерів та дрібнодисперсних частинок феромагнітного наповнювача вздовж силових ліній напруженості магнітного поля (рис. 5). Також зростає вміст гель-фракції у матеріалі, що забезпечує покращення міцнісних характеристик матеріалу. Встановлено, що з перевищенням величини магнітної індукції понад 650...680 Тл, ударна в'язкість більше не зростає. Це можна пояснити тим, що за таких значень магнітної індукції вміст гель-фракції в матеріалі сягає максимальних значень, і завершується процес просторової орієнтації, оскільки ланцюги макромолекул полімерів вже максимально впорядковані. Тому подальше підвищення величини індукції магнітного поля вже не забезпечує покращення досліджуваних характеристик матеріалу, і є недоцільним.

## Висновки

Встановлено, що оброблення полімерних композицій змінним магнітним полем низької частоти на основі епоксидного зв'язувача дає

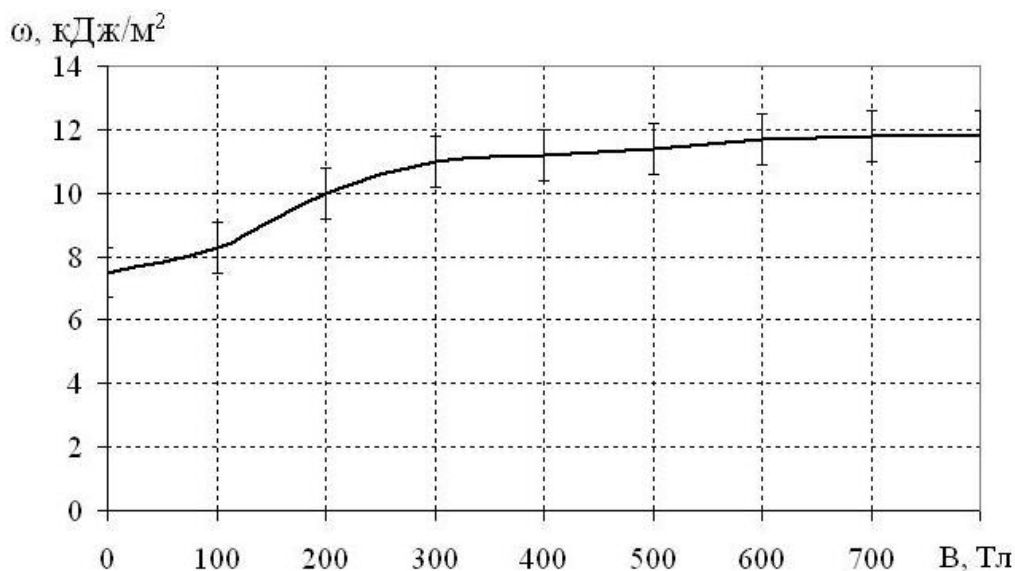


Рисунок 5 – Залежність ударної в'язкості від індукції змінного магнітного поля

змогу підвищити їх фізико-механічні характеристики, а саме ударної в'язкості на 38 % для матриці та 55 % – для композиту з феритовим наповнювачем, теплостійкості – на 4 % та 5,5 % відповідно, модуля пружності – на 46 % та 42 %, руйнівного напруження при згині – на 29 % та 60 %. Встановлено, що за оптимального часу обробки в 60 хв, максимальний ефект досягається при частоті змінного магнітного поля 20-300 кГц. Доведено, що основною величиною, що впливає на покращення когезійних характеристик епоксикомполімерів, які оброблялися у магнітному полі, є магнітна індукція. Причому суттєве покращення фізико-механічних характеристик спостерігали при індукції в 650-680 Тл.

### Література

1 Кальба Є.М., Букетов А.В. Вплив наповнювачів різної хімічної і магнітної природи на теплофізичні властивості гетерогенних полімерних систем // Фізика конденсованих високомолек. систем. Наукові записки Рівненського педінституту. – В.3. – Рівне: РДПУ, 1997. – С.31-32.

2 Голотенко С. Фізико-механічні властивості захисних полімер композитних покриттів, наповнених дисперсними наповнювачами, що підлягали обробці зовнішніми фізичними полями / С.Голотенко // Вісник ТНТУ. – 2010. – Том 15, № 3. – С. 23-29. – (механіка та матеріалознавство).

3 Стухляк П. Д. Епоксикомполімерні матеріали, модифіковані енергетичними полями / Стухляк П. Д., Букетов А. В., Добротвор І. Г. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.

4 Розробка пристрою для обробки епоксикомполімерів високочастотним магнітним полем / П.Стухляк, В.Карташов: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С.105.

5 Молчанов Ю.М. Некоторые особенности структурных изменений эпоксицидной смолы под воздействием магнитных полей / Ю.М. Молчанов, Ю.П. Родин, Э.Р. Кисис // Механика полимеров. – 1978. – № 4. – С. 583–587.

6 Кальба Є.М. Регулювання структури і властивостей полімеркомполімерних зносостійких і корозійостійких покриттів магнітною обробкою / Є.М. Кальба, А.В. Букетов // Фізико-хімія конденсованих неоднорідних систем: Матеріали III Всеукраїнської конференції «Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики». – Ч.П. – К.: КНПУ. – 1998. – С.104-107.

7 Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 176 с.

8 Мамуня Є.П. Структура і електричні властивості електропровідних полімерних композицій / Є.П. Мамуня, С.Л. Василенко, І.М. Парашенко, Є.В. Лебедев, М.І. Шут // Композ. полім. матер. – 2003. – Т. 25, №1. – С. 36–42.

9 Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М.: Высш.шк., 1986. – 352 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
26.04.11

Рекомендована до друку професором  
Петриною Ю.Д.