

Стухляк П. Модернізація автоматизованого торсійного маятника для комп'ютерної обробки результатів дослідження динамічних властивостей епоксикомпозитів / Стухляк П., Чихіра І., Букетов А. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Спецвипуск — частина 1. — С.141-148. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 667.64:678.026

П. Стухляк<sup>1</sup>, докт. техн. наук; І. Чихіра<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
А. Букетов<sup>2</sup>, докт. техн. наук

<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
<sup>2</sup>Херсонська державна морська академія

## МОДЕРНІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТОРСІЙНОГО МАЯТНИКА ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

**Резюме.** В автоматизованому режимі задання циклу послідовних коливань і впливу середовищ з різною в'язкістю досліджено динамічні характеристики епоксидних композитних матеріалів. Встановлено, що використання епоксидного середовища у системі “сердечник інерційного диска – постійний магніт” збільшує точність вимірювання амплітуди коливань.

**Ключові слова:** торсійний маятник, властивості, композитний матеріал, динамічні характеристики, наповнювач.

P.Stuhlyak, I.Chyhira, A.Buketov

## UPGRADING AUTOMATED TORSION PENDULUM FOR COMPUTER PROCESSING OF RESULTS OF INVESTIGATION OF DYNAMIC PROPERTIES EPOKSYKOMPOZYTYV

**The summary.** In automatic mode setting cycle fluctuations and the impact of successive environments with different viscosity studied the dynamic characteristics of epoxy composite materials. Found that the use of epoxy medium in the “core inertial drive – a permanent magnet” increases the accuracy of the amplitude.

**Key words:** torsion pendulum, properties, composite material, dynamic characteristics, filler

**Постановка завдання.** На сьогодні автоматизація безперервних технологічних процесів дослідження властивостей полімерних композитних матеріалів (КМ) при їх формуванні є актуальною як з наукової, так і з практичної точок зору. Наукові основи отримання полімерних композитних матеріалів для захисту технологічного устаткування ґрунтуються на дослідженні фізико-хімічних процесів на межі поділу фаз “олігомер – наповнювач” [1-3]. Важливе значення при формуванні композитів має структуроутворення зв'язувача у шарах на межі поділу фаз навколо поверхні наповнювача. Відомо [3, 4], що для отримання необхідної інформації про явища міжфазової взаємодії і кінетику перебігу процесів структуроутворення, широко використовують динамічні методи дослідження. Важливе місце у вказаному напрямку досліджень належить низькочастотним випробуванням релаксаційних властивостей композитів при твердненні за допомогою торсійних маятників в автоматизованому режимі упродовж тверднення досліджуваних композицій.

Метод вільнозгасних коливань, які використовували при дослідженні на описаному приладі, дає можливість вимірювати значення тангенса кута механічних втрат  $tg \delta$  рухомої системи “торсіон – інерційна маса”. Розроблено прилад і методику дослідження динамічних характеристик зразків при твердненні [4], що працює за методом ТВА (Torsional Braid Analysis). Прилад призначений для вимірювання динамічних характеристик полімерних матеріалів при їх формуванні. За вказаними характеристиками визначали кінетику їх тверднення. Особливістю роботи приладу є

вимірювання кута відхилення інерційного диска, який кріпиться до торсіона з волокон і епоксидної композиції.

Торсійний маятник містить пусковий механізм 1, який виконано у вигляді крокового двигуна, що задає імпульс обертового руху на заданий кут. До вихідного вала пускового механізму кріпиться зразок 2 у вигляді торсіона (заплетені у пучок нитки з різних за природою волокон), який просякнутий композицією. До зразка закріплено інерційний диск 3, у якому виконано вікно у вигляді сектора. Вікно обладнане поляризаційним елементом 4. Маятник має оптичну систему реєстрації кута повороту, що містить джерело лазерного випромінювання 5 й аналізатор 6. При цьому вимірник випромінювання з'єднаний з платою "вводу-виводу" дискретних сигналів з гальванічною розв'язкою, котру через аналого-цифровий перетворювач з'єднано з персональним комп'ютером для опрацювання і зберігання результатів експерименту. Це забезпечує можливість автоматизованого управління експериментом. Для центрування торсійного маятника у нижній частині інерційного диска 3 виконано магнітний сердечник 7 у вигляді циліндра з конусом, вершина якого направлена до постійного магніта 8, що кріпиться до корпусу маятника 9.

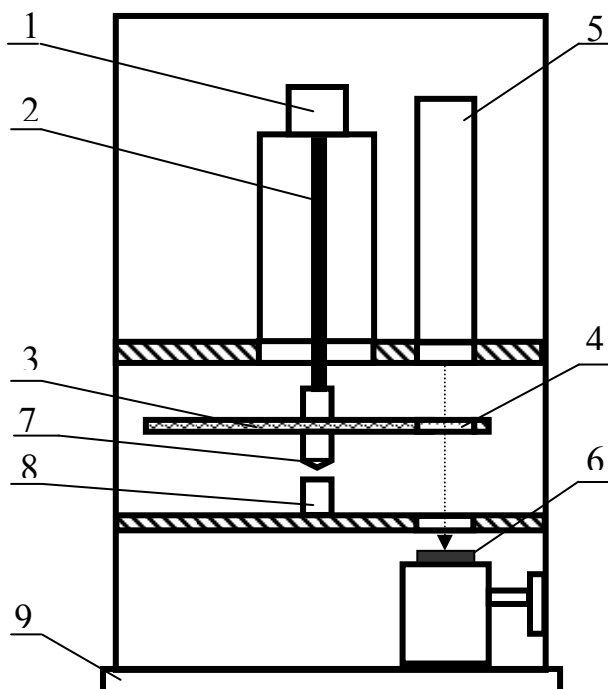


Рисунок 1. Схема торсійного маятника:

- 1 – пусковий механізм;
- 2 – зразок;
- 3 – інерційний диск;
- 4 – поляризаційний елемент;
- 5 – джерело випромінювання;
- 6 – аналізатор;
- 7 – магнітний сердечник;
- 8 – постійний магніт;
- 9 – корпус

Слід зазначити, що одним із недоліків при експлуатації даного приладу є центрування магнітного сердечника постійним магнітом у повітряному середовищі, що призводить до значних похибок під час обчислення відносних характеристик амплітуд коливання інерційного диска. Усунення даного недоліку випробувань дозволить підвищити їх точність та автоматизувати сам процес досліджень.

**Мета роботи** – модернізувати автоматизований торсійний маятник з метою зменшення похибки дослідження динамічних характеристик епоксикомпозитів у процесі їх формування.

**Матеріали і методика дослідження.** Реєстрування амплітуди коливань інерційного диска з дискретністю, що задається таймером, до повного затухання коливань торсійного маятника забезпечується програмою, яка записана у персональному комп'ютері. Виконання магнітного сердечника на інерційному диску у вигляді циліндра з конусом, вершина якого направлена до торцевої частини постійного

магніта, забезпечує центрування диска упродовж усього часу досліджень. Один цикл випробувань продовжується 30 с. Тривалість випробувань зразка становить  $5 \pm 0,2$  год. Як торсіон маятника використовували пучок ниток з волокон, заплетених у косу з кроком у межах 5-12 мм. Кожна нитка складається з 1500-2000 волокон, що дозволяє на них утримувати відносно велику кількість досліджуваного полімерного матеріалу. Торсіон виготовляли зі скляних, вуглецевих і базальтових волокон. Просякнення епоксидним олігомером торсіона відбувається при зануренні останнього у ванну з досліджуваним матеріалом. Довжина зразка складає 20 см при товщині одного волокна 9-12 мкм. Випробування закінчували після досліджень упродовж 5 год, коли процеси структуроутворення у композиті практично завершені.

**Результати експерименту.** Попередньо проведеними дослідженнями експериментально встановлено залежність тангенса кута механічних втрат від часу тверднення КМ на основі епоксидної смоли ЕД-20 на торсіоні з волокон різної природи [3]. Однією з основних вимірювальних характеристик при розрахунку тангенса кута механічних втрат є встановлення значень початкової і проміжної амплітуд коливань інерційного диска. Надалі аналізували результати, що записували в автоматизованому режимі при використанні спеціально розробленої програми, з одночасним обчисленням показників вказаних амплітуд у відносних одиницях із занесенням у пам'ять комп'ютера.

Зазначимо, що важливою характеристикою маятників такого типу є центрування інерційного диска перед початком кожного наступного циклу випробувань. Таке центрування на розробленому [4] торсійному маятнику здійснювали шляхом використання постійного магніту, що міститься під магнітним сердечником диска на сталій плиті. При цьому зауважимо, що вказане центрування у повітряному середовищі не є достатньо ефективним, оскільки при дослідженнях, особливо під час обчислення відносних характеристик амплітуд, спостерігали значні похибки на кривих залежності “амплітуда коливань – тривалість дослідження” упродовж одного циклу випробувань. Вказана похибка (рис. 2) зумовлена, у першу чергу, інерційністю системи “диск – постійний магніт”. На неї впливає відносно незначний час стабілізації системи і для приведення її у початкове положення рівноваги. Зазначимо, що наступний цикл випробувань відбувається зразу ж після закінчення попереднього, під час вмикання обертового моменту кроковим двигуном. Вказані фактори призводять до утворення значних неточностей на кривих залежності зміни амплітуд коливань від часу дослідження, що суттєво утруднює аналіз експериментальних результатів і обчислення основних досліджуваних характеристик КМ.

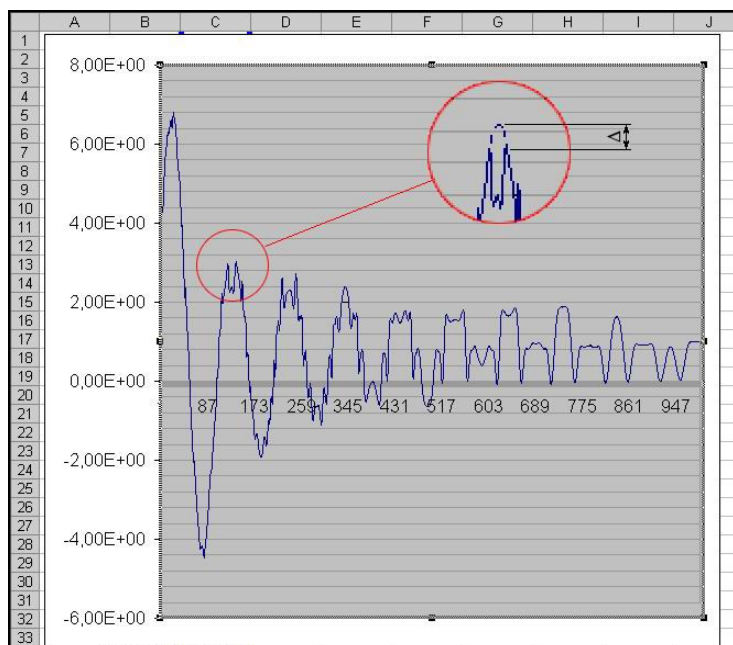


Рисунок 2. Залежність амплітуди коливань від часу упродовж одного циклу досліджень для системи “диск – постійний магніт” у повітряному середовищі

Виходячи з цього, з метою зменшення похибки вимірювань амплітуд коливань на різних етапах дослідження запропоновано частково збільшити в'язкість середовища у системі “сердечник інерційного диска – постійний магніт” (рис. 3). Це зменшить час на стабілізацію вказаної системи і забезпечить швидке повернення диска у положення рівноваги для початку наступного циклу дослідження. Для цього на постійний магніт, що розміщений на сталевій плиті, вміщували резервуар з досліджуванним середовищем, в'язкість якого визначали попередньо.

Перед проведенням експериментальних досліджень динамічних характеристик композитів третю частину сердечника інерційного диска, що виконаний у вигляді конуса, вміщували у резервуар з досліджуванним середовищем. Об'єм резервуара становить –  $15 \pm 0,5$  мл. З метою зменшення похибки вимірювань як середовище у резервуарі вибрано матеріали з різною в'язкістю: дистильована вода, аліфатична смола ДЕГ-1, промислове мастило марки И-20 і епоксидна смола марки ЕД-20. Зауважимо, що умовну в'язкість вказаних матеріалів досліджували на розробленому електровібраційному віскозиметрі, конструкцію якого і методику дослідження наведено у праці [5].



Рисунок 3. Загальний вигляд робочої частини маятника

Для вибраних середовищ під час дослідження на торсійному маятнику отримали криві залежності амплітуди коливань від часу, що дозволяє точніше визначити абсолютне значення амплітуди коливань. При цьому встановлено, що точність експерименту прямопропорційна в'язкості вибраного матеріалу. Доведено, що використання запропонованих в'язких матеріалів для середовища у системі “інерційний диск – постійний магніт” не призводить до суттєвого зменшення абсолютного значення амплітуди коливань (рис. 4). Використання як середовища дистильованої води і аліфатичної смоли ДЕГ-1 не є доцільним, оскільки на графіках залежності амплітуди від часу спостерігали значну похибку експерименту (рис. 4 а, б).

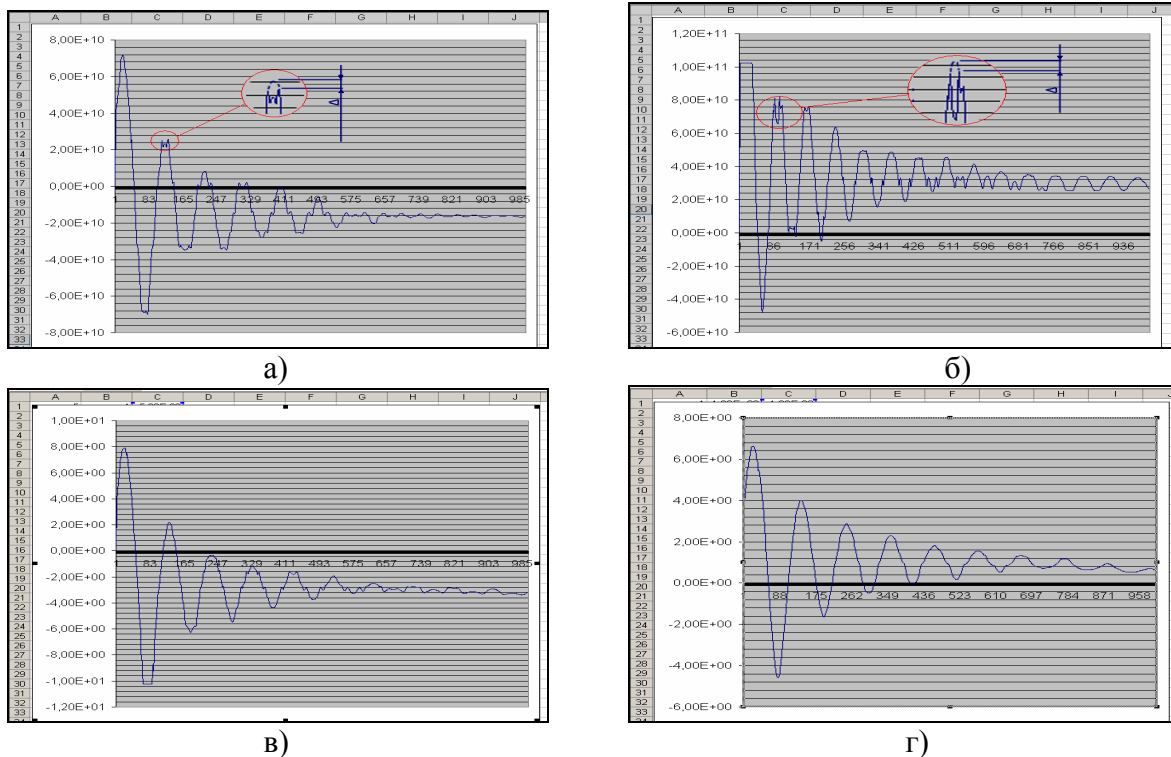


Рисунок 4. Залежність амплітуди коливань від часу упродовж одного циклу досліджень для системи “диск – постійний магніт” при використанні середовища: а) дистильована вода; б) аліфатична смола ДЕГ-1; в) промислове мастило марки И-20; г) епоксидна смола марки ЕД-20

У цьому випадку, як зазначено вище, визначення значень амплітуди є утрудненим унаслідок значної похибки експерименту на кривих залежності “амплітуда коливань – тривалість циклу дослідження”. Перспективним у цьому плані є використання більш в'язких матеріалів, таких, як промислове мастило марки И-20 і епоксидна смола марки ЕД-20. Встановлено, що введення у систему “інерційний диск – постійний магніт” вказаних елементів призводить до максимального зменшення похибки вимірювань амплітуди коливань практично без зменшення абсолютного значення вказаних амплітуд (рис. 4 в, г). Виходячи з цього, надалі при проведенні дослідження динамічних характеристик епоксикомпозитів на торсійному маятнику у систему “інерційний диск – постійний магніт” використовували резервуар із в'язким середовищем, яким вибрано епоксидну смолу ЕД-20 (рис. 5).

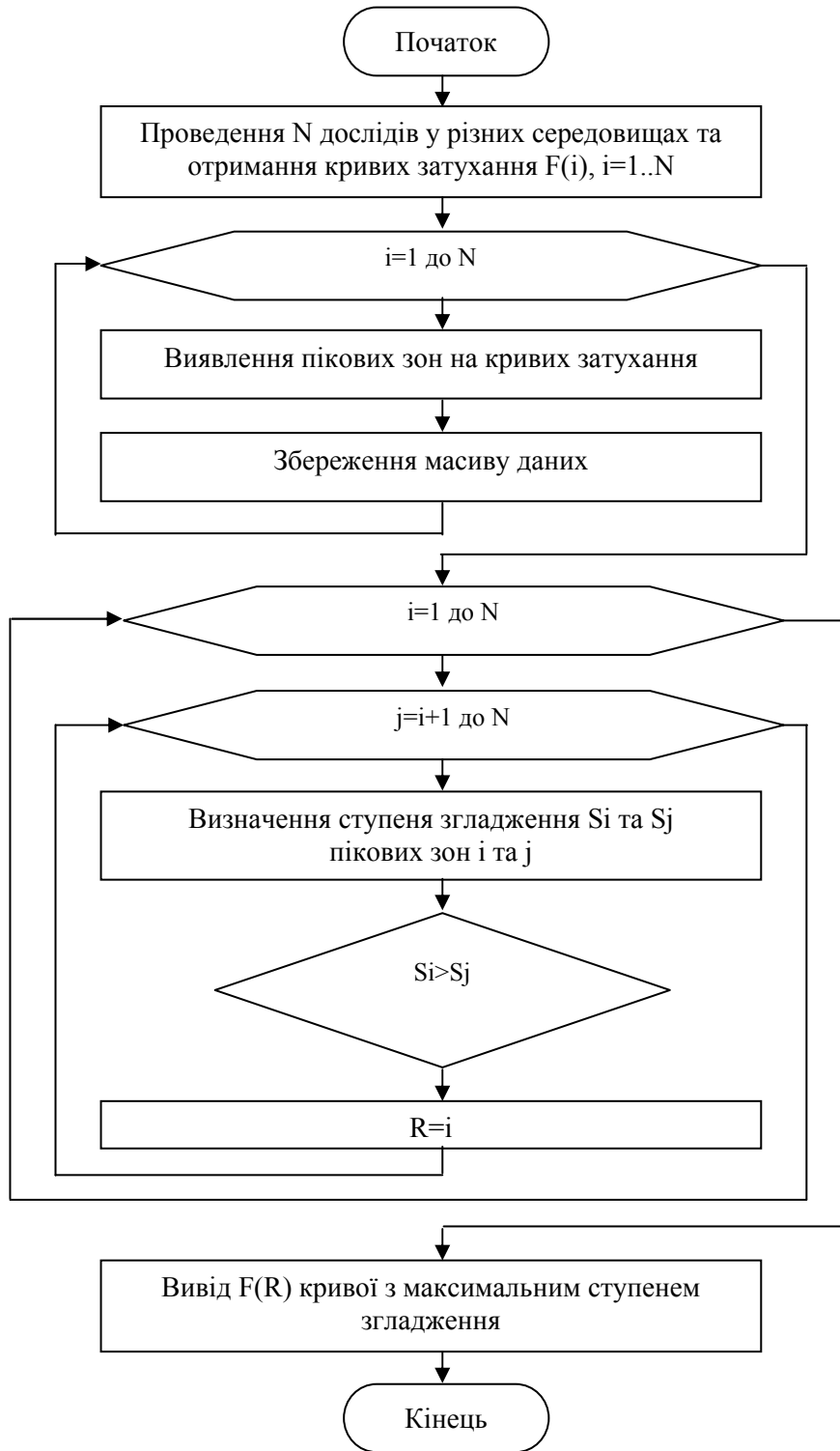


Рисунок 5. Алгоритм визначення оптимального середовища.

На наступному етапі аналізували результати дослідження тангенса кута механічних втрат у процесі тверднення епоксидних композицій на торсіоні зі скляних, базальтових і вуглецевих волокон. Для опрацювання результатів експериментальних досліджень використовували сплайн-інтерполяцію. Кубічна сплайн-інтерполяція дозволяє побудувати криву через набір точок таким чином, що перші й другі її похідні будуть неперервними у кожній точці. Причому вказана крива формується шляхом введення ряду кубічних поліномів, що проходять через набір трьох сусідніх точок (рис.6).

Надалі за допомогою кубічних поліномів за допомогою програми Mathcad 11 будували криві залежності тангенса кута механічних втрат від часу тверднення композиції з утворенням єдиної кривої. Крім того, одночасно при використанні кубічної сплайн-інтерполяції інтегрували функцію згладжування з опрацювання експериментальних даних *Supsmootx* ( $x, y$ ) [6]. Вказана функція повертає  $n$ -вимірний вектор, утворений локальним використанням симетричної лінійної процедури згладжування методом найменших квадратів за правилом “ $K$ ”-ближчих сусідів, де величина “ $K$ ” вибирається адаптивно. Тут  $x$  і  $y$  –  $n$ -вимірні вектори вихідних даних. Важливим у використанні цієї функції є забезпечення фільтрації експериментальних даних. Найчастіше метою такої фільтрації є попередження швидких варіацій  $y(x_i)$ , що зумовлені шумом. У результаті отримуємо згладжену залежність, у котрій домінує низькочастотніша складова. Встановлено, що вказаний підхід забезпечує не лише підвищення точності експериментальних досліджень, але й швидке опрацювання отриманих результатів із використанням функції згладжування шляхом застосування кубічної сплайн-інтерполяції.

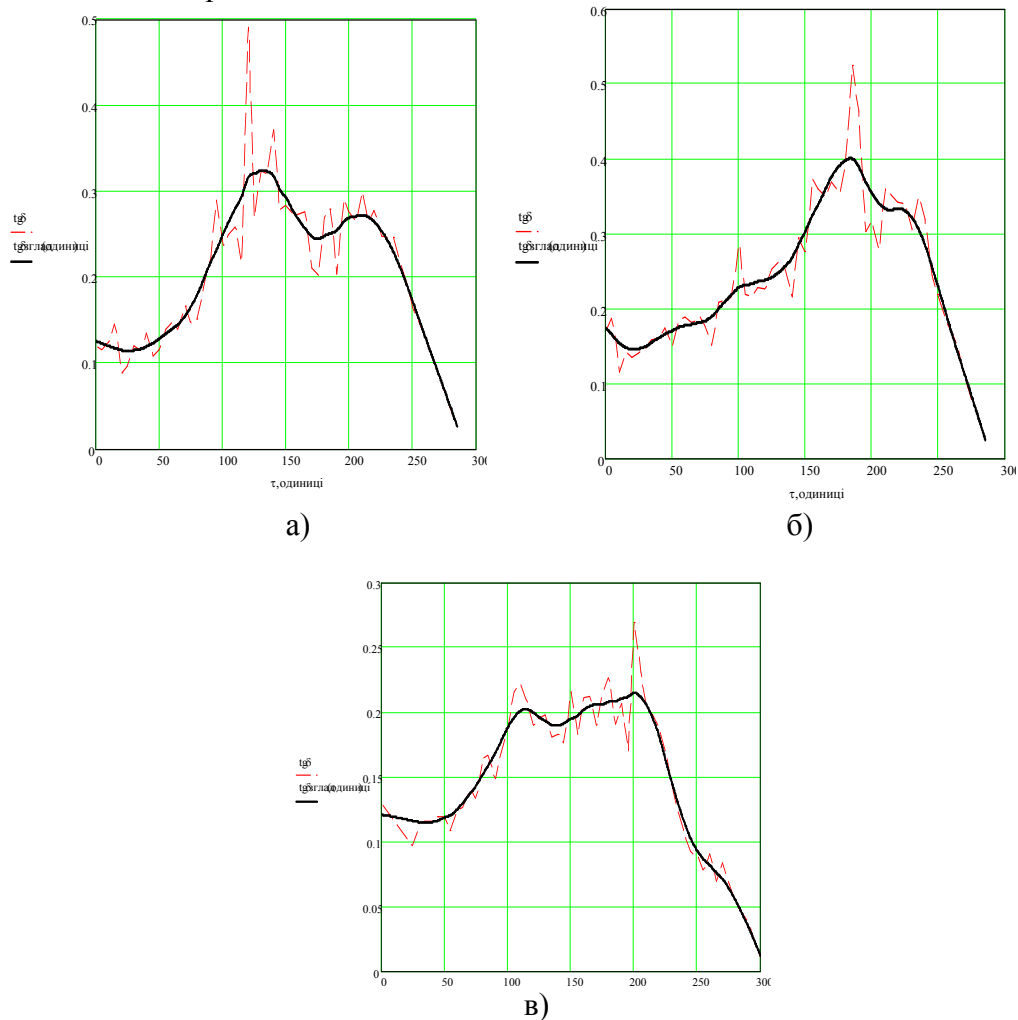


Рисунок 6. Залежність тангенса кута механічних втрат від тривалості тверднення епоксидної матриці на основі смоли ЕД-20 у присутності:

- а) скляного волокна;
- б) базальтового волокна;
- в) вуглецевого волокна

**Висновки.** Запропоновано новий підхід до методики дослідження динамічних характеристик епоксидних композитних матеріалів. З метою зменшення похибки вимірювань амплітуди коливань на різних етапах дослідження запропоновано збільшити в'язкість середовища у системі “сердечник інерційного диска – постійний магніт”. Спостерігали зменшення часу на стабілізацію вказаної системи і забезпечення швидкого повернення диска у положення рівноваги для початку наступного циклу дослідження. Вказаний підхід забезпечує високу точність вимірювань амплітуди коливань інерційного диску, що поліпшує достовірність отриманих результатів в автоматизованому режимі.

#### **Література**

1. Суберляк, О.В. Вплив полівінілпіролідону на структурування епоксиамінних композицій [Текст] / О.В. Суберляк, Т.Г. Гуменецький, О.В. Лавренюк, О.А. Миган // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2003. – №447. – С. 71–73.
2. Ліцов, М. Застосування полімеризаційноздатних рідких систем та двошарових полімерних стрічок з активною поверхнею для протикорозійного захисту трубопроводів [Текст] / М. Ліцов, А. Ліцов, О. Максимова // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2004. – Т.1. – №4. – С.396–400.
3. Стухляк, П.Д. Епоксидні матеріали, модифіковані енергетичними полями [Текст] / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, І.Г. Добротвор. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.
4. Патент № 54057. Україна, МПК G01H1/00. Торсійний маятник / А.Г. Микитишин, П.Д. Стухляк, М.М. Митник, А.В. Букетов (Україна). – № 2002043534; заявл. 26.04.2002; опубл. 17.02.2003, Бюл. № 2. – 5с.
5. Букетов, А.В. Дослідження реологічних властивостей полімеркомпозитних матеріалів на розробленому пристрої [Текст] / А.В. Букетов, Є.М. Кальба, С.М. Голотенко // Праці I Міжнародної науково-технічної конференції (DSR AM-I) “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин”. – Тернопіль: ТДТУ. – 2004. – С. 419–423.
6. Макаров, Е.О. Инженерные расчеты в системе MathCad [Текст] / Е.О. Макаров. – М.: Питер, 2003. – 447 с.