

4. Azahari N. A. Biodegradation studies of polyvinyl alcohol-corrstarch blend films in solid and solution media / N. A. Azahari, N. Othman, H. Ismail // J. of Physical Science. – 2011. – Vol. 22 (2). – P. 15–31.
5. Jelinska N. Blends of PVA with natural fillers / N. Jelinska V. Tupureina, A. Dzene // Material science and applied chemistry. – 2008. – Vol. 16. – P. 27-33.
6. Reed C. R. Composite tissue engineering on polycaprolactone nanofiber scaffolds / C. R. Reed, L. Han, A. Andraday et al // Annals of Plastic Surgery. – 2009. – Vol. 62. – No 5. – P. 505-512.
7. Agarwa, S. I. Use of electrospinning technique for biomedical applications / S. I. Agarwa, J. H. Wendorff, A. Greiner // Polymer. – 2008. – Vol. 49. – P. 5603-5621.
8. Liu J. Y. Fabrication and characterization of polycaprolactone/calcium sulfate whisker composites / J. Y. Liu, L. Reni, Q. Wei et al. // Express Polymer Letters. – 2011. – Vol. 5. – No. 8. – P. 742-752.
9. Cinelli P. Hybrid composite based on poly (vinyl alcohol) and fillers from renewable resources / P. Cinelli, E. Chiellini, S. H. Imam // J. of Appl. Polymer Science. – 2008. – No 109. – P. 1684-1691.
10. Мариц А. А. Получение трехмерного биодegradируемого композита / А. А. Мариц // Національна екологіч-на політика в контексті європейської інтеграції України : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 27 жов/ 2010 р.). – К. : Центр екологічної освіти та інформації, 2010. – С. 271-276.
11. Pat. 4580788, USA. Split ring sealing device for high pressure service / George B. Rabe, Robert H. Johnson. – 1986. – April 8.
12. Розенберг М. Э. Полимеры на основе винилацетата / М. Э. Розенберг. – Л. : Химия, 1983. – 176 с.
13. Premraj R. Biodegradation of polymers / R. Premraj, M. Doble // Indian Journal of Biotechnology. – 2005. – Vol. 4. – P. 186-193.
14. Chiellini E. Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based materials // E. Chiellini, A. Corti, S. D'Antone, R. Solaro // Progress in Polymer Science. – 2003. – Vol. 28. – P. 963-1014.
15. Srinivasaa P. C. Properties and sorption studies of chitosan-polyvinyl alcohol blend film / P. C. Srinivasaa, M. N. Rameshb, K. R. Kumarc, R. N. Tharanathan // Carbohydrate Polymers. – 2003. – Vol. 53. – P. 431-438.
16. Julinova M. Lignin and starch as potential inductors for biodegradation of films based on poly(vinyl)alcohol and protein hydrolysate // M. Julinova, J. Kupec, P. Alexy et al. // Polymer Degradation and Stability. – 2010. – Vol. 95. – P. 225-233.
17. Ozakia S. K. Biodegradable composites from waste wood and poly(vinyl)alcohol / S. K. Ozakia, M. B. Monteiro, H. Yano et al. // Polymer Degradation and Stability. – 2005. – Vol. 87. – P. 293-299.
18. Chiellini E. Composite films based on poly(vinylalcohol) and lignocellulosic fibers preparation and characterizations / E. Chiellini, P. Cinelli, S. H. Imam, L. I. Mao // Biorelated Polymers – Sustainable Polymer Science and Technology / ed. by E. Chiellini, H. Gil, G. Braunegg et al. – New York : Kluwer, 2001 – P. 87-100.

Розроблено нову лабораторну установку для компресійного формування тривимірних біодegradуючих композитів. Пристрій зручний у використанні, включає розбірну прес-форму, ущільнення метал до металу, не потребує електроживлення.

**Ключові слова:** компресійне формування, полімерний композит, біодegradація.

Надійшла до редакції 15.04.2012

УДК 535.024:620.168:678.02:678.5.059

**КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., пр.н.с., СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## **ПРОГНОЗУВАННЯ КІНЕТИКИ ВИПАРОВУВАННЯ РОЗЧИННИКІВ ПІД ЧАС СУШІННЯ ТКАНИХ ПРОСОЧЕНИХ НАПОВНЮВАЧІВ**

Описано удосконалену методику визначення вмісту летких компонентів у незатверділому препрезі з композиційного матеріалу на основі тканих наповнювачів, просочених розчином реактопластичного полімерного зв'язувального, та прогнозування кінетики випаровування летких компонентів під час попереднього сушіння незатверділого препрегу.

**Ключові слова:** кінетика, сушіння, тканина, наповнювач, просочення, епоксид, зв'язувальне.

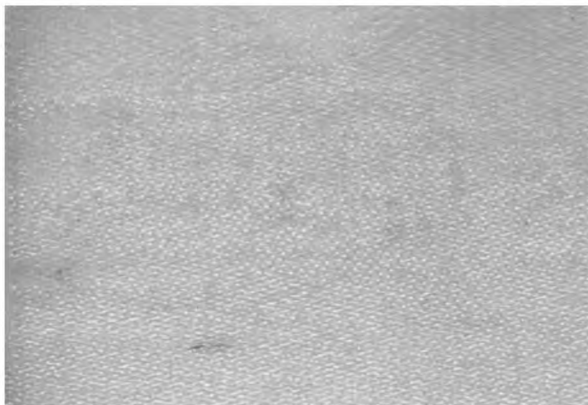
**Постановка проблеми.** Під час просочення волокнистих наповнювачів полімерними зв'язувальними необхідним є зменшення в'язкості полімерного термореактивного зв'язувального до наперед заданої величини та її підтримання в заданих межах [1]. Найпростішими способами реалізації цієї процедури є нагрівання зв'язувального до певної температури, змішування вихідного зв'язувального з леткими розчинниками (спиртом, ацетоном тощо) або їхнє комбінування.

Після просочення леткі компоненти слід обов'язково видалити, чого досягають попереднім сушінням. Адже, якщо відбудеться неповне видалення розчинників, це зазвичай призводить до короблення готових (висушених) виробів, що суттєво погіршує їхні фізико-механічні характеристики. Наслідком попереднього сушіння є збільшення сумарних енергетичних затрат. Тому прогнозування кінетики випаровування розчинників під час попереднього сушіння тканих наповнювачів, просочених розчинами епоксидних зв'язувальних, є актуальною задачею.

**Аналіз попередніх досліджень.** Уміст летких компонентів у незатверділому препрезі з композиційних матеріалів на основі тканих наповнювачів, просочених розчином полімерного зв'язувального, зазвичай визначають ваговим методом, використовуючи зразок просоченого наповнювача діаметром 100 мм чи квадратного перерізу 100×100 мм [1, с. 96-97]. Зразок зважують до й після п'ятихвилинного попереднього сушіння в термостаті за температури 160 °С. Шуканий вміст летких компонентів у препрезі визначають як  $L = (A_2 - A_3)/A_2 \cdot 100 \%$ , де  $A_2$  і  $A_3$  – маса зразка до і після попереднього сушіння, г. Проте цей метод потребує високої температури попереднього сушіння, періодичного зважування зразків і великої кількості вимірювань для отримання статистично достовірних результатів.

**Метою** статті є вдосконалення методики визначення вмісту летких компонентів у незатверділому препрезі з композиційного матеріалу на основі тканих наповнювачів, просочених розчином полімерного зв'язувального, та прогнозування кінетики випаровування летких компонентів під час попереднього сушіння.

**Методика досліджень.** Відповідно до вдосконаленої методики прогнозування кінетики випаровування розчинників під час попереднього сушіння попередньо просочений наповнювач (препрег) термостатують у сушильній камері за певного температурно-часовому режиму та фіксованого зусилля натягу волокнистого наповнювача, просоченого розчином полімерного (епоксидного) зв'язувального (ЕЗ). Потім крізь препрег пропускають циліндричний пучок модульованого світла, спрямований нормально до поверхні препрегу. Реєструють зміну інтенсивності пучка світла з часом, і визначають коефіцієнт світлопропускання. За швидкістю зміни світлопропускання можна визначати вміст летких компонентів, отже контролювати кінетику попереднього сушіння [3]. Різке змінення коефіцієнта світлопропускання на окремих часових відрізках кінетичної кривої попереднього сушіння дозволяє діагностувати якість препрегу. Таким чином, методика полягає в порівняльному (з еталомом) аналізі експериментальних кінетичних кривих попереднього сушіння препрегу на основі ЕЗ без розчинника та ЕЗ з розчинником, дозволяючи діагностувати вміст летких компонентів у препрезі за значень коефіцієнта світлопропускання від 0,96 до  $10^{-4}$ .



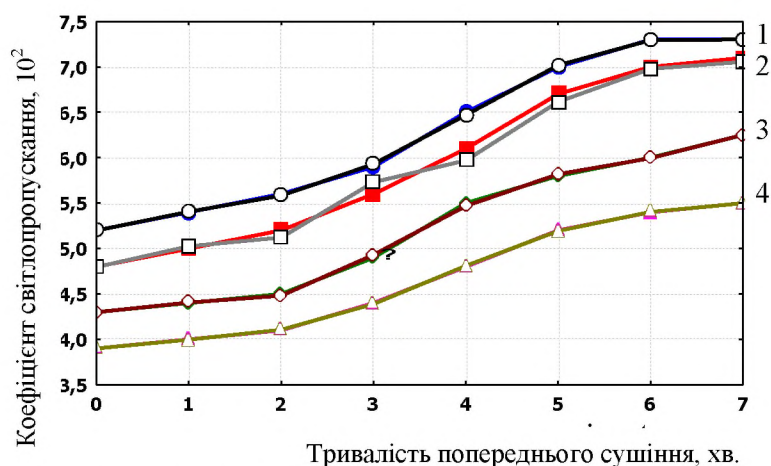
**Рис. 1** – Просочений і висушений зразок полімерного композиту на основі кремнеземної склотканини КТ-11-ТОВА та ЕЗ марки ЕДТ-10

днього сушіння 120 °С, тривалість попереднього сушіння – 10 хв., зусилля натягу – 3 Н.

**Аналіз результатів.** Особливістю стадії попереднього сушіння є наявність майже завершеного розподілу ЕЗ між нитками склотканини (рис. 1). Коефіцієнт спрямованого світлопропускання на ділянці, що досліджується, майже не змінюється. Саме тому його різке змінення на окремій ділянці кінетичної кривої попереднього сушіння дозволяє опосередковано діагностувати якість препрегу.

Встановлено, що кінетична крива світлопропускання під час сушіння має ділянки пропорційності й насичення. Тривалість насичення визначено як точку перетину дотичних до двох ділянок кінетичної кривої.

Для наведених на рис. 2 кривих попереднього сушіння препрегів у початковому стані нанесення ЕЗ марки ЕДТ-10 (чи лаку ЛБС-4) на склотканину КТ-11-ТОВА становила 35 %, температура попере-



Уміст летких компонентів: 1(○) – 0%; 2(□) – 1%; 3(◇) – 3%; 4(Δ) – 5%

Рис. 2 – Кінетичні криві світлопропускання тканого наповнювача із кремнеземної склотканини КТ-11-ТОА, просоченої епоксидним зв'язувальним ЕДТ-10

Перший і другий варіанти прогнозування кінетичних параметрів попереднього сушіння доцільно використовувати під час попереднього сушіння препрегу, третій – до попереднього сушіння. На основі аналізу кривих світлопропускання (див. рис. 2) визначено, що середня швидкість зміни світлопропускання за 5 хв. попереднього сушіння становила  $0,27 \cdot 10^{-2}$  одиниць на хвилину (за початкового вмісту летких компонентів 5%), тривалість досягнення насичення – 5,9 хв., відношення початкових коефіцієнтів світлопропускання – 0,73.

**Оптимізація кінетичного параметра випаровування.** На основі аналізу праці [1, с. 105-106] та отриманих експериментальних даних (див. рис. 2) можна зробити припущення, що залежність коефіцієнта світлопропускання  $k_t$  від вмісту летких компонентів протягом попереднього сушіння тривалістю  $t_c$  тканих наповнювачів, просочених ЕЗ марки ЕДТ-10 (або бакелітовим лаком ЛБС-4) із різним вмістом  $\zeta_{л}$  летких компонентів, має нелінійний характер. Тому при математичному моделюванні кінетичних параметрів попереднього сушіння наявні дані апроксимовано поліномами 2...7 порядку.

На основі числових досліджень із застосуванням методів планування експериментів, що здійснювали за допомогою програмного продукту STAT-SENS [2], прийнято рішення зупинитися на поліноміальному рівнянні 6-го порядку, що з прийнятною для трактування отриманих результатів точністю ( $10^{-2}$ ) описує наявні експериментальні дані:

$$k_t(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 + b_6x^6$$

де змінна  $x = t_c$  – тривалість попереднього сушіння тканого наповнювача, просоченого ЕЗ із різним вмістом  $\zeta_{л}$  летких компонентів;  $b_0, b_1, \dots, b_6$  – константи, що підлягають визначенню.

Отримані статистичним методом адекватні статистичні математичні моделі кінетики попереднього сушіння за різного вмісту  $\zeta_{л}$  летких компонентів у досліджуваному ЕЗ мають такий вигляд:

коли  $\zeta_{л} = 0\%$ ,  $k_t(x) \cdot 10^2 = 5,19918 + 0,28538x - 0,0926x^2 - 0,00291x^3 + 0,021047x^4 - 0,00462x^5 + 0,00027x^6$ ;

коли  $\zeta_{л} = 1\%$ ,  $k_t(x) \cdot 10^2 = 4,7963 + 1,73234x - 2,91324x^2 + 1,870564x^3 - 0,52324x^4 + 0,066298x^5 - 0,00313x^6$ ;

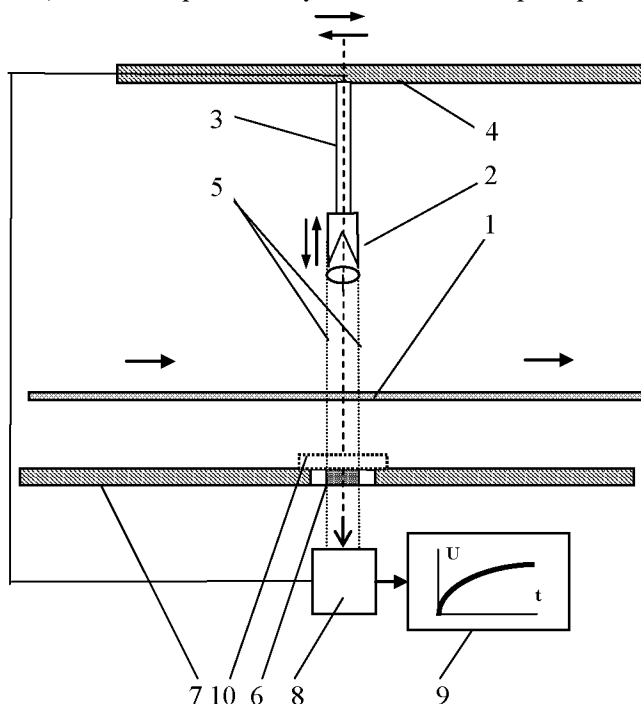
коли  $\zeta_{л} = 3\%$ ,  $k_t(x) \cdot 10^2 = 4,29914 + 0,6263x - 0,95675x^2 + 0,55385x^3 - 0,12949x^4 + 0,013486x^5 - 0,00052x^6$ ;

коли  $\zeta_{л} = 5\%$ ,  $k_t(x) \cdot 10^2 = 3,9003 + 0,212853x - 0,19682x^2 + 0,092752x^3 - 0,01068x^4 + 2,7 \cdot 10^{-5}x^5 + 6,94 \cdot 10^{-5}x^6$ .

Порівняння експериментальних і розрахованих значень коефіцієнта світлопропускання дає можливість стверджувати, що отримані математичні залежності достатньо точно описують експериментальні дані. Це дозволяє використовувати їх у задачах інтерполяції для прогнозування кінетичних параметрів технологічного процесу попереднього сушіння, а саме його тривалості, залежно від наперед заданого вмісту летких компонентів у вихідному ЕЗ, що містить розчинники.

**Прив'язка засобів прогнозування до конструктивних елементів обладнання.** Удосконалену методику прогнозування кінетичних параметрів апробували на просочувально-сушильній машині МПТ-3 підприємства УкрНДІТМ (м. Дніпропетровськ). Призначення машини МПТ-3 – просочування полімерними зв'язувальними ролонних тканин та їх інтенсивне сушіння у рециркуляційній камері з аеродинамі-

чним нагріванням. Сушильна камера машини МПТ-3 містить два роторні теплогенератори, що забезпечують нагрівання та автономне підтримання заданої температури теплоносія в трьох зонах сушіння. Дві сушильні зони використовують для сушіння просоченого полотна (попереднього та остаточного). Третя (середня) – для попереднього сушіння полотна перед просоченням.



- 1 – просочений тканин наповнювач (препрег); 2 – джерело стабілізованого модульованого світла (лампа СЦ-61);  
3 – напрямна, уздовж якої переміщують джерело 2;  
4 – поперечина напрямної 3; 5 – фронт локалізованого випромінювання (циліндричний пучок модульованого світла);  
6 – фотодіод ФД-1; 7 – основа для розміщення фотодіода 6;  
8 – вимірювач світлопропускання ИПС-8204;  
9 – самописець КСП-4; 10 – захисне скло

**Рис. 3 – Схема вузла попередньої діагностики параметрів попереднього сушіння просочувально-сушильної машини МПТ-3**

на фотодіод 6, використовують захисне скло 10. Вузол діагностики вмісту летких компонентів для попереднього сушіння виконують у пожежевибухобезпечному варіанті.

Після вимірювань у статичному режимі за заданої температури у зоні попереднього сушіння вибирають еталонні значення коефіцієнта світлопропускання зразків препрегів. При цьому вміст летких компонентів у препрезі визначають після досягнення мінімального відхилення плинної величини коефіцієнта світлопропускання, що отримують за заданих тривалості й температури сушіння, від еталонного значення за тих же умов. Залежно від отриманих результатів визначають необхідність подальшого сушіння препрегу.

**Висновки.** Розроблена удосконалена методика визначення вмісту летких компонентів у незатверділому препрезі з композиційного матеріалу на основі тканин наповнювачів, просочених розчином полімерного зв'язувального, дозволяє діагностувати вміст летких компонентів у препрезі під час попереднього сушіння за значень коефіцієнта світлопропускання від 0,96 до  $10^{-4}$ , прискорює вимірювання завдяки відсутності періодичного зважування препрегів і дозволяє спрогнозувати тривалість зменшення вмісту летких до заданої величини.

Діагностику параметрів попереднього сушіння здійснювали таким чином (рис. 3). При освітленні поверхні препрегу 1, що надійшов до секції попереднього сушіння і перебуває в ній протягом певного часу, використовують циліндричний пучок модульованого світла з довжиною хвилі  $\lambda = 600$  нм від джерела випромінювання 2. Джерело 2 має змогу переміщатися вздовж напрямної 3, що кріпиться до поперечини 4, для змінення відстані від препрегу 1. Напряму 3 конструктивно пов'язано зі стінками сушильної секції машини і розташовано паралельно поверхні препрегу 1.

Перед початком вимірювань локалізують діаметр світлової плями (фронт локалізованого випромінювання 5) і відстань від джерела 2 до препрегу 1 залежно від структурних властивостей зразка препрегу, а також технологічних властивостей ЕЗ.

Під час вимірювань енергія джерела 2 перетворюється в електричний сигнал на фотодіоді 6, закріпленому на основі 7, що також пов'язана зі стінками сушильної секції, який реєструють вимірювачем 8 із подальшим виведенням результатів на дисплей. Діапазон вимірювання напруги фотоemisії становить 0...50 мВ із точністю вимірювань  $\pm 0,5$  мВ.

Щоб зв'язувальне не потрапило

**Список використаної літератури**

1. Шалун Г. Б. Слоистые пластики / Г.Б. Шалун, Е. М. Сурженко. – Л. : Химия, 1978. – 232 с.
2. Статюха Г. О. Розробка комп'ютерної системи підготовки та обробки даних у межах застосування експериментально-статистичної методології для хіміко-технологічних систем / Г. О. Статюха, А. Г. Петрань // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2000. – № 1. – С. 100-106.
3. Пат. 15244 Україна, МПК (2006) G 01 N 21/33. Спосіб визначення вмісту летючих компонентів у неза-тверділому препрезі / О. Є. Колосов — № u200512821; заявл. 29.12.05 ; опубл. 15.06.06, Бюл. № 6.

Надійшла до редакції 28.12.2012.

---

**Kolosov O. Ye., Syvetskyu V. I.**

*PREDICTION OF THE KINETICS OF EVAPORATION OF SOLVENTS IN THE PRE-DRYING OF WOVEN FILLERS IMPREGNATED WITH SOLUTIONS OF EPOXY RESINS*

*The developed improved method of determining of the content of volatile components in the unhardened prepreg composite material based on woven fillers, impregnated with duroplastic resin binder solution and prediction of the kinetics of evaporation of volatile components in the pre-drying of nonsolified prepreg are described.*

**Keywords:** *prediction, kinetics, drying, fabric, filler, impregnation, epoxide, binder.*

**References**

1. Shalun G. B. Sloistye plastiki [Laminated plastics] / G.B. Shalun, E. M. Surzhenko. – L. : Himija, 1978. – 232 s.
  2. Statiukha H. O. Rozrobka kompiuternoi systemy pidhotovky ta obrobky danykh u mezhakh zastosuvannia eksperymentalno-statystychnoi metodolohii dlia khimiko-tekhnologichnykh system [Development of computer system for preparing and processing of data within the experimental application of statistical methodology for chemical process systems] / H. O. Statiukha, A. H. Petran // Naukovi visti NTUU «KPI». – 2000. – # 1. – S. 100-106.
  3. Pat. 15244 Ukraina, IPC (2006) G 01 N 21/33. Sposib vyznachennia vmistu letiuchykh komponentiv u nezatverdilomu preprezi [Method of determination of volatile components in impregnated woven fillings] / O. Ye. Kolosov — # u200512821; zaiavl. 29.12.05 ; opubl. 15.06.06, Biul. # 6.
-