



УКРАЇНА

(19) UA (11) 82975 (13) C2  
(51) МПК (2006)  
G01N 15/08  
G01N 33/36

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО РАДІУСА ПОР ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗУСИЛЛЯ НАТЯГНЕННЯ НАПОВНЮВАЧА ПРИ ПРОСОЧУВАННІ

1

(21) а200712276

(22) 06.11.2007

(24) 26.05.2008

(46) 26.05.2008, Бюл.№ 10, 2008 р.

(72) КОЛОСОВ ОЛЕКСАНДР ЄВГЕНОВИЧ, UA

(73) КОЛОСОВ ОЛЕКСАНДР ЄВГЕНОВИЧ, UA

(56) SU 1742681 A1, 23.06.1992

SU 890160, 15.12.1981

SU 859877, 30.08.1981

SU 669271, 25.06.1979

SU 646231, 05.02.1979

US 3 683 674, 15.08.1972

(57) 1. Спосіб визначення ефективного радіуса пор орієнтованих волокнистих наповнювачів у залежності від зусилля натягнення наповнювача при просочуванні, який полягає у тому, що пористе середовище у вигляді армуючих наповнювачів з регулярною структурою просочують полімерною рідиною, будують експериментальні кінетичні криві просочування, а саме залежність висоти просочування або підйому просочувальної рідини уздовж волокнистого наповнювача (h) у часі (t), знаходять ефективний радіус пор ( $r_{\text{еф}}$ ) розрахунковим шляхом у залежності від характеристик структури пористого середовища і реологічних властивостей просочувальної рідини, який **відрізняється** тим, що будують експериментальні кінетичні криві просочування у залежності від прикладеного дискретного значення зусилля натягнення (N) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, знаходять значення ефективного радіуса пор ( $r_{\text{еф}}$ ) у залежності від прикладеного дискретного значення зусилля натягнення (N) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, будують криву залежності ефективного радіуса пор ( $r_{\text{еф}}$ ) від прикладених дискретних значень зусиль натягнення (N) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, після чого знаходять співвідношення для теоретичної кривої залежності ефективного радіуса пор ( $r_{\text{еф}}$ ) від прикладених значень зусилля натягнення (N) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, де  $r_{\text{еф}}$  - ефективний радіус пор,  $10^{-6}$  м,

2

N - прикладене зусилля натягнення орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, Н/м, a, b, c, d - постійні коефіцієнти співвідношення, що визначають за умови найкращого наближення експериментальної і теоретичної кривих залежності ефективного радіуса пор ( $r_{\text{еф}}$ ) від прикладеного зусилля натягнення (N) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні знаходять за допомогою співвідношення

$$r_{\text{еф}}(N) = -6,27 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 + 0,00011 \cdot N^2 - 0,00719 \cdot N + 0,32869.$$

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що проводять дотичну до експериментальної кінетичної кривої, побудованої при дискретному значенні зусилля натягнення (N) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, у фіксований момент часу (t), обчислюють тангенс кута нахилу ( $\text{tg } \alpha$ ) дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу (t) за фіксованої висоти підйому просочувальної рідини (h), а ефективний радіус пор ( $r_{\text{еф}}$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача з регулярною структурою при дискретному значенні його зусилля натягнення (N) при просочуванні

$$r_{\text{еф}} = \text{tg } \alpha \frac{4\eta h}{\sigma \cos \theta},$$

де  $\text{tg } \alpha$  - тангенс кута нахилу дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу t, c,

h - висота підйому просочувальної рідини у фіксований момент часу, м,

$\eta$  - в'язкість просочувальної рідини, Па·с,

$\theta$  - крайовий кут змочування просочувальною рідиною поверхні орієнтованого волокнистого наповнювача, град,

$\sigma \cdot \cos \theta$  - змочувальна здатність просочувальної рідини, Н/м.

4 Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що ефективний радіус пор ( $r_{\text{еф}}$ ) орієнтованих

(13) C2

(11) 82975

(19) UA

волокнистих наповнювачів з регулярною структурою визначають із співвідношення

$$r_{\text{ef}} = \frac{\eta h^2}{2\sigma \cos \theta \cdot t}.$$

Винахід відноситься до технології переробки і проектування технологічних параметрів формування полімерних композиційних матеріалів, а саме до прогнозування технологічних параметрів процесу просочування армуючих волокнистих наповнювачів, переважно орієнтованих, полімерними (переважно реактопластичними) зв'язуючими.

Як аналог вибраний спосіб вимірювання ефективного радіуса пор у пористих виробках, що включає заповнення рідиною еталонного виробу, приведення його в контакт із досліджуванним зразком, при цьому вимірюють радіус циліндричного наскрізного капіляра, герметизують після заповнення рідиною вільний кінець капіляра, вимірюють довжину стовпчика рідини у капілярі до приведення в контакт з вимірюваним виробом і після контакту у момент досягнення капілярної рівноваги визначають ефективний радіус пор із

$$P_a = \psi \cdot R / [1 - (\ell_0 - \ell_{\text{проп}}) / (\ell_0 - \ell_{\text{ост}})],$$

де  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягнення змочуючої рідини,  $P_a$  - атмосферний тиск,  $R$  - радіус капіляра,  $\theta$  - крайовий кут змочування,  $\ell_{\text{проп}}$  - довжина стовпчика рідини до приведення у контакт з вимірюваним виробом,  $\ell_{\text{ост}}$  - довжина стовпчика рідини після встановлення капілярної рівноваги,  $\ell_0$  - довжина капіляра [2].

Недолік способу аналога - складність реалізації та мала достовірність результатів досліджень, а також неможливість його використання для полімерних композиційних матеріалів на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів регулярної структури.

Відомий спосіб вимірювання ефективного радіуса пор пористого середовища, що вибраний як прототип [2]. Згідно цьому способу, пористе середовище у вигляді армуючих наповнювачів з регулярною структурою прочують рідиною, будують криві розподілу пор за розмірами, а також експериментальні кінетичні криві просочування, а саме залежність висоти просочування або підйому просочувальної рідини уздовж волокнистого наповнювача  $h$  у часі  $t$ , а шуканий радіус пор  $r_{\text{ef}}$  знаходять розрахунковим шляхом у залежності від характеристик пористої структури середовища і реологічних властивостей просочувальної рідини.

Однак і спосіб прототипу є досить складним і трудомістким для визначення ефективного радіуса пор у полімерних композиційних матеріалах на основі регулярних волокнистих наповнювачів.

В основу винаходу поставлена задача спрощення з одночасним підвищенням ефективності визначення ефективного радіуса пор у залежності від прикладеного зусилля натягнення у структурі полімерних композиційних матеріалів на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів

регулярної структури та полімерних (реактопластичних) зв'язуючих за рахунок проведення ряду вимірювань на кінетичній кривій просочування та здійснення експериментально-теоретичних розрахунків, зокрема, застосування експериментально-статистичного моделювання.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі визначення ефективного радіуса пор орієнтованих волокнистих наповнювачів у залежності від зусилля натягнення наповнювача при просочуванні, який полягає у тому, що пористе середовище у вигляді армуючих наповнювачів з регулярною структурою прочують полімерною рідиною, будують експериментальні кінетичні криві просочування, а саме залежність висоти просочування або підйому просочувальної рідини уздовж волокнистого наповнювача ( $h$ ) у часі ( $t$ ), знаходять ефективний радіус пор ( $r_{\text{ef}}$ ) розрахунковим шляхом у залежності від характеристик структури пористого середовища і реологічних властивостей просочувальної рідини, новим є те, що, будують експериментальні кінетичні криві просочування у залежності від прикладеного дискретного значення зусилля натягнення ( $N$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, знаходять значення ефективного радіуса пор ( $r_{\text{ef}}$ ) розрахунковим шляхом у залежності від прикладеного дискретного значення зусилля натягнення ( $N$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, будують криву залежності ефективного радіуса пор ( $r_{\text{ef}}$ ) від прикладених дискретних значень зусиль натягнення ( $N$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, а шукану теоретичну залежність ефективного радіуса пор ( $r_{\text{ef}}$ ) від прикладених значень зусилля натягнення ( $N$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача при

$$r_{\text{ef}}(N) = a \cdot N^3 + b \cdot N^2 + c \cdot N + d,$$

де  $r_{\text{ef}}$  - ефективний радіус пор,  $\cdot 10^{-6}$  м,  
 $N$  - прикладене зусилля натягнення орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні, Н/м,

$a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — постійні коефіцієнти співвідношення, що визначають за умови найкращого наближення експериментальної і теоретичної кривих залежності ефективного радіуса пор від прикладеного зусилля натягнення ( $N$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача при Шукану залежність ефективного радіуса пор ( $r_{\text{ef}}$ ) від прикладених значень зусилля натягнення ( $N$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача при просочуванні знаходять за допомогою співвідношення

$$r_{\text{ef}}(N) = -6,27 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 + 0,00011 \cdot N^2 - 0,00719 \cdot N + 0,32869.$$

Проводять дотичну до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу ( $t$ ),

обчислюють тангенс кута нахилу ( $\operatorname{tg} \alpha$ ) дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу ( $t$ ) за фіксованої висоти підйому просочувальної рідини ( $h$ ), а ефективний радіус пор ( $r_{\text{еф}}$ ) орієнтованого волокнистого наповнювача з регулярною структурою знаходять із співвідношення

$$r_{\text{еф}} = \operatorname{tg} \alpha \frac{4\eta h}{\sigma \cos \theta},$$

де  $\operatorname{tg} \alpha$  - тангенс кута нахилу дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу  $t$ , с,

$h$  - висота підйому просочувальної рідини у фіксований момент часу, м,

$\eta$  - в'язкість просочувальної рідини, Па·с,

$\Theta$  - крайовий кут змочування просочувальною рідиною поверхні орієнтованого волокнистого наповнювача, град,

$\sigma \cdot \cos \Theta$  - змочувальна здатність просочувальної рідини, Н/м.

Ефективний радіус пор ( $r_{\text{еф}}$ ) орієнтованих волокнистих наповнювачів з регулярною структурою визначають із співвідношення

$$r_{\text{еф}} = \frac{\eta h^2}{2\sigma \cos \theta}.$$

Перераховані вище ознаки складають суть винаходу.

Наявність причинно-наслідного зв'язку між сукупністю істотних ознак винаходу і технічним результатом, що досягається, полягає в

При визначенні ефективного радіуса пор армуючих волокнистих наповнювачів з регулярною структурою експериментально-розрахунковим шляхом перш за все треба мати шукані експериментальні кінетичні криві

просочування досліджуваних волокнистих наповнювачів полімерними зв'язуючими, які потім описують певними математичними залежностями.

Теоретичні кінетичні рівняння просочування отримані за припущення течії в'язкої рідини, що не стискується, і описують у загальному випадку рух зв'язуючого в системі випадкових пор пористого середовища з використанням класичної теорії фільтрації для ламінарної (внаслідок високої в'язкості полімерних просочувальних рідин) течії в'язкої рідини, що не стискується.

Розглянемо процес просочування на прикладі скловолкнистих наповнювачів тканого типу. У випадку, якщо пори наповнювача, які з'єднані між собою, розташовані регулярно (ткані структури), і довжини та діаметри їх співрозмірні, характеристикою процесу просочування може слугувати загальна висота рівня просочувальної рідини, що підіймається під дією капілярних сил.

При просочуванні однонаправленої волокнистої арматури має місце виражена анізотропія швидкості капілярної проникності полімерного розчину: максимальна швидкість спостерігається уздовж капілярних каналів волокнистої структури, а мінімальна — у

Виберемо як характеристику поперечного просочування для тканого наповнювача (або поздовжнього просочування для джгута) загальну

висоту рівня просочувальної рідини. Швидкість penetрації (або поздовжнього просочування у випадку джгута) може бути знайдена, наприклад, з рівняння (1) рівноваги сил, що діють у капілярі [3]

$$\Delta P = \Delta P_{\text{зовн}} + \Delta P_{\text{ідр}} + \Delta P_{\text{в'язк}} = 0, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{\text{зовн}}$  - зовнішні сили, що віднесені до одиниці площі поперечного перетину,

$\Delta P_{\text{ідр}}$  - гідростатичний тиск,

$\Delta P_{\text{в'язк}}$  - сили в'язкого тертя, віднесені до одиниці площі поперечного перетину.

Зовнішні сили дорівнюють

$$\Delta P_{\text{зовн}} = \Delta P_{\text{кап}} = \Delta A_{\text{змоч}} / \Delta h,$$

де  $\Delta A_{\text{змоч}}$  - робота сил змочування при підйомі рідини на висоту  $\Delta h$ , віднесена до одиниці площі поперечного перетину капіляра

$$\Delta A_{\text{змоч}} = S_{\text{уд}} \Delta h (\sigma_{\text{тж}} - \sigma_{\text{тг}}) = S_{\text{уд}} \Delta h \sigma_{\text{жг}} \cos \Theta.$$

Тут  $S_{\text{уд}}$  - поверхня одиниці об'єму капілярно-пористого тіла,

$\sigma_{\text{тг}}, \sigma_{\text{тж}}, \sigma_{\text{жг}}$  - відповідно поверхневий натяг на кордоні розділу "тверде тіло — газ", "тверде тіло — рідина", "рідина - газ",

$\Theta$  - крайовий кут змочування.

Тоді

$$\Delta P_{\text{зовн}} = S_{\text{уд}} \sigma_{\text{жг}} \cos \Theta.$$

Другий член рівняння (1) дорівнює

$$\Delta P_{\text{ідр}} = -\Delta A_{\text{ідр}} / \Delta h,$$

де  $\Delta A_{\text{ідр}}$  - робота, необхідна для підняття стовпа рідини висотою  $h$  на висоту  $\Delta h$ , віднесена до одиниці площі поперечного перетину

$$\Delta A_{\text{ідр}} = \varepsilon \gamma g h \Delta h,$$

де  $\varepsilon$  - пористість.

Звідси

$$\Delta P_{\text{ідр}} = -\Delta A_{\text{ідр}} / \Delta h = -\varepsilon \gamma g h.$$

Третій член рівняння (1) визначається як

$$\Delta P_{\text{в'язк}} = -\frac{S_{\text{тр}}}{r_{\text{еф}}} \eta h \frac{dh}{dt},$$

де  $\eta$  - в'язкість рідини,

$r_{\text{еф}}$  - ефективний радіус пор,

$S_{\text{тр}}$  - поверхня тертя течії рідини в одиниці об'єму тіла.

Для орієнтованих волокнистих і тканих наповнювачів можна прийняти  $S_{\text{тр}} \approx S_{\text{уд}}$ .

Тоді рівняння (1) можна переписати таким чином

$$\Delta P = S_{\text{уд}} \sigma_{\text{жг}} \cos \Theta - \varepsilon \gamma g h - \frac{S_{\text{тр}}}{r_{\text{еф}}} \eta h \frac{dh}{dt} = 0, \quad (2)$$

рішення його має вигляд

$$t = \frac{\eta S_{\text{тр}} S_{\text{уд}} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2 r_{\text{еф}}} \left[ \ln \left| \frac{1}{1 - \varepsilon \gamma g h / S_{\text{уд}} \sigma \cos \theta} \right| - \frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{\text{уд}} \sigma \cos \theta} \right] \quad (3)$$

При  $t \rightarrow \infty$  максимальна висота підйому рідини (гранична висота поздовжнього просочування)  $h_{\infty}$  дорівнює

$$h_{\infty} = \frac{S_{\text{уд}} \sigma \cos \theta}{\gamma g \varepsilon}.$$

Тоді формула (3) прийме вигляд

$$t = \frac{h_{\infty}}{a_0} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{h}{h_{\infty}} \right) \right] - \frac{h}{h_{\infty}} = \frac{h_{\infty}}{a_0} \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - \frac{h}{h_{\infty}}} \right) - \frac{h}{h_{\infty}} \right]. \quad (4)$$

Формула (4) для малих часів (регулярні ткани пористі структури) з урахуванням розкладання логарифмічної функції у ступеневий ряд і відкидання членів ряду більш, ніж третього порядку малості, запишеться таким чином

$$t = \frac{\eta \phi_s h^2}{2\sigma \cos \theta \cdot r_{\text{еф}}} = \frac{\eta S_{\text{тр}} h^2}{2S_{\text{уд}} \sigma \cos \theta \cdot r_{\text{еф}}}. \quad (5)$$

З рівняння (5) випливає, що час, необхідний для просочування волокнистого наповнювача полімерним зв'язуючим на висоту  $h$ , прямо пропорційний  $h^2$  і обернено пропорційний еквівалентному (ефективному) капілярному

Рівняння (5) дозволяє прогнозувати основні кінетичні параметри процесу просочування (час і швидкість просочування, висоту підйому зв'язуючого), а також конструктивні параметри обладнання для просочування (габарити просочувальної ванни).

Для визначення ефективного капілярного радіуса  $r_{\text{еф}}$  вищеописаним методом потрібно знати експериментальний розподіл пор по розмірам у структурі композиту. Для випадку тканого армуючого наповнювача, тобто наповнювача з регулярною структурою, до вирішення цієї задачі можна підійти іншим способом.

З аналізу рівняння (5) за умови  $S_{\text{тр}} \approx S_{\text{уд}}$  (для регулярної структури волокнистих наповнювачів) маємо вираз для ефективного радіусу пор  $r_{\text{еф}}$

$$r_{\text{еф}} = \frac{\eta h^2}{2\sigma \cos \theta \cdot t}, \quad (6)$$

тобто, знаючи реологічні властивості просочувального зв'язуючого й експериментальну кінетичну криву процесу просочування, можна розрахунковим шляхом знайти значення ефективного радіусу пор  $r_{\text{еф}}$ . Причому це значення не повинно залежати від характеру кінетичної кривої, тобто від конкретного вибору точки  $O(t_0, h_0)$  на відрізку кінетичної кривої (див. фіг. 1).

З рівняння наступного (7) можна також знайти значення ефективного радіусу пор  $r_{\text{еф}}$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{r_{\text{еф}} \sigma \cos \theta}{4\eta h} \Rightarrow r_{\text{еф}} = \frac{dh}{dt} \frac{4\eta h}{\sigma \cos \theta} = \text{tg} \alpha \frac{4\eta h}{\sigma \cos \theta}, \quad (7)$$

де  $\text{tg} \alpha$  - тангенс кута нахилу дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу.

Таким чином, за розробленим способом, маючи експериментальну кінетичну криву просочування і знаючи тангенс кута нахилу ( $\text{tg} \alpha$ ) дотичної до експериментальної кінетичної кривої у фіксований момент часу ( $i$ ) за фіксованої висоти підйому просочувальної рідини ( $h$ ), а також її реологічні властивості, а саме в'язкість ( $\eta$ ), поверхневий натяг ( $\sigma$ ) та крайовий кут змочування ( $\theta$ ), можна по формулі (7) знайти

шуканий ефективний радіус пор  $r_{\text{еф}}$  тканого армуючого наповнювача, або волокнистого наповнювача з регулярною структурою.

Спосіб реалізують наступним чином.

Для дослідження кінетики поздовжнього просочування волокнистих наповнювачів використали метод капілярного підняття полімерного зв'язуючого по волокну, що моделює реальні умови просочування армуючих наповнювачів полімерним зв'язуючим у технології отримання волокнистих композитів.

Як наповнювач 1 (див. фіг.2) використовували джгут з склоровінгу марки ВМС 10-40х1-78, який занурювали одним кінцем в зв'язуюче 2 марки ЕДТ-10 в скляному теплообміннику 3 (див. фіг.2). Товщина джгута становила 2 мм, ширина 10 мм, довжина 100 мм.

Для створення необхідного зусилля натягнення  $N$  до кінця джгута підвішували вантаж 4 (зусилля натягнення наповнювача становило  $N = 30$  Н/м). Температуру в теплообміннику підтримували з точністю до  $1^\circ\text{C}$  за допомогою термостату U-10 (на фіг.2 не показаний). Як теплоносії використали воду. Вимірювання проводили в температурному інтервалі від  $50$  до  $70^\circ\text{C}$ , характерному для реальних умов процесу

Переміщення верхнього рівня зв'язуючого реєструвалося катетометром 5 типу КМ-6, навпроти об'єктиву якого встановлювалось симетрично відносно теплообмінника джерело стабілізованого світла 6, тобто досліджували світлопропускання просочуваного орієнтованого волокнистого наповнювача.

Динамічну в'язкість зв'язуючого  $\eta$  визначали за допомогою реовіскозиметра Хеплера. Вона становила  $0,5$  Па·с. Змочувальну здатність зв'язуючого визначали по максимальній висоті його затікання по скляному капіляру під дією сил поверхневого натягнення. Знайдене значення  $\sigma \cos \theta$  дорівнює  $2 \cdot 10^{-2}$  Н/м.

Після пропускання джгута волокнистого наповнювача через зв'язуюче останнє починало підійматися по капілярних каналах ниток внаслідок дії капілярних сил. Швидкість і висота підйому зв'язуючого по перетину наповнювача, що відлічувалась від рівня зв'язуючого в теплообміннику, була більшою в місцях меншого міжволоконного капілярного радіуса, тобто була нерівномірною. При цьому капілярні сили в зоні меніску стягували волокна, а в нижніх перетинах спостерігалось розпливання волокон і набухання, вертикальний кордон якого приймали за кордон

На фіг.3 зображені кінетичні криві поздовжнього просочування для склоровінгу при температурі просочування  $50^\circ\text{C}$  (зусилля натягнення наповнювача становило  $N = 30$  Н/м), а також кінетична крива, що отримана розрахунковим шляхом за рівнянням (6).

На фіг.3 прийняті наступні позначення: (o) - експериментальна крива, отримана при зусилля натягнення наповнювача  $N = 30$  Н/м; (\*) - крива, побудована за рівнянням (6). З фіг.3 видно, що теоретичне рівняння (6) досить добре описує кінетику просочування волокнистого наповнювача.

Очевидно, що при коректній побудові експериментальних кінетичних кривих значення  $r_{ef}$ , отримані за цими двома рівняннями (6) і (7), не повинні суттєво відрізнятися. Наведемо значення для  $r_{ef}$ , що отримані за формулами (6) і (7) відповідно:  $r_{ef} = 0,41 \cdot 10^{-6}$  м і  $r_{ef} = 0,40 \cdot 10^{-6}$  м.

З аналізу кінетичних рівнянь (6) і (7) також випливає, що обробка кінетичних кривих, отриманих при різних значеннях зусилля натягнення армуючого наповнювача  $N$ , дозволяє отримувати шукану залежність ефективного радіуса пор  $r_{ef} = f(N)$ .

Можна припустити, що в результаті натягнення волокнистого наповнювача ефективний капілярний радіус  $r_{ef}$  буде змінюватись, а саме зменшуватись. При цьому швидкість просочування буде зменшуватись як у результаті зміни структури, так і в результаті зменшення товщини наповнювача згідно

На фіг.4 показана експериментальна залежність розрахункового значення ефективного капілярного радіуса досліджуваного орієнтованого склонаповнювача  $r_{ef}$  від зусилля його натягнення  $N$  при температурі просочування  $50^\circ\text{C}$ . Отримана графічна експериментальна залежність та побудовані відповідні кінетичні криві просочування при варіативних значеннях зусилля його натягнення  $N$  повністю підтвердили припущення про те, що швидкість просочування зменшується як у результаті зміни структури, так і в результаті зменшення товщини (ущільнення) наповнювача.

Знайдене за формулою (6) значення ефективного капілярного радіуса для скловолокнистого наповнювача джгутового типу при нульовому зусиллі натягнення становило  $0,33$  мкм.

При здійсненні модельної апроксимації експериментально одержаної залежності ефективного капілярного радіуса тканого наповнювача  $r_{ef} = f(N)$  у процесі просочування (див. фіг.4) в результаті чисельного аналізу ряду апроксимуючих моделей [4-6] прийшли до висновку, що відповідно до розрахованих статистичних характеристик (SSE, SSR,  $r_{xy}$  і  $R^2$  - про ці характеристики див. далі) шуканої залежності доцільно використовувати апроксимуючу модель для змінної  $y$  вигляді кубічного поліному:  $Y(X) = -6,27 \cdot 10^{-7} X^3 + 0,00011 X^2 - 0,007195 X + 0,32869$ . де  $X$  - вхідний параметр (фактор) просочування, що означає питоме зусилля натягнення  $N$  (Н/м) волокнистого наповнювача в процесі просочування,

$$Y(X) = r_{ef}(N),$$

$a, b, c, d$  — постійні коефіцієнти рівняння (8), що підлягають визначенню.

Отримана статистичним методом [4] адекватна модель залежності  $r_{ef} = f(N)$  має такий вигляд:  $Y(X) = -6,27 \cdot 10^{-7} X^3 + 0,00011 X^2 - 0,007195 X + 0,32869$ . (9)

У таблиці 1 наведено результати порівняння експериментальних та розрахованих (модельних) даних залежності  $r_{ef} = f(N)$ .

Таблиця 1

Результати порівняння експериментальних та розрахованих (модельних) даних залежності  $r_{ef} = f(N)$  для орієнтованого склонаповнювача при температурі просочування  $50^\circ\text{C}$

№ пп..	$X \equiv N(\text{H/M})$	$Y \equiv r_{ef}(\cdot 10^{-6} \text{ м})$	$Y_{\text{розн.}} (\cdot 10^{-6} \text{ м})$
1	0	0,33	0,328
2	4	0,30	0,301
3	8	0,27	0,277
4	12	0,25	0,257
5	16	0,24	0,239
6	20	0,22	0,223
7	24	0,21	0,211
8	28	0,20	0,200
9	32	0,19	0,191
10	36	0,18	0,183
11	40	0,17	0,177
12	44	0,17	0,172
13	48	0,168	0,168
14	52	0,165	0,165
15	56	0,162	0,162
16	60	0,16	0,159

У таблиці 2 наведені статистичні характеристики отриманого апроксимуючого рівняння (9).

Таблица 2

Статистичні характеристики [4] отриманого рівняння (9), що описує залежність розрахункового значення ефективного капілярного радіуса  $r_{\text{еф}}$  орієнтованого склонаповнювача від зусилля його натягнення  $N$  при температурі просочування  $T = 50^\circ\text{C}$

Сума квадратів помилок (SSE)	Сума квадратів, що пояснює регресію (SSR)	Коефіцієнт кореляції ( $r_{x,y}$ )	Коефіцієнт детермінації ( $R^2$ )
0,00094509	$1,07 \cdot 10^{-5}$	0,999746	0,999683

З аналізу табл. 1 і 2 та з фіг.4 видно практично повний збіг експериментальних і теоретичних даних, а саме кривих залежності ефективного радіуса пор від прикладеного зусилля натягнення (7V) волокнистого наповнювача при просочуванні. Це свідчить про те, що рівняння (9) можна використовувати для прогнозних розрахунків залежності ефективного капілярного радіуса  $r_{\text{еф}}$  орієнтованого склонаповнювача від зусилля його натягнення  $N$  при температурі просочування (у досліджуваному випадку при  $T = 50^\circ\text{C}$ ).

Очевидно, що за розробленим способом для інших температур просочування  $T$  треба також знаходити експериментальні залежності  $r_{\text{еф}} = f(N)$ , тобто будувати сімейство цих експериментальних кривих. Після цього за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання треба знаходити коефіцієнти апроксимуючого рівняння (8) для конкретного значення зусилля натягнення  $N$ , тобто знаходити значення  $r_{\text{еф}}$ , яке входить в рівняння (6), що використовується для побудови кінетичних кривих просочування.

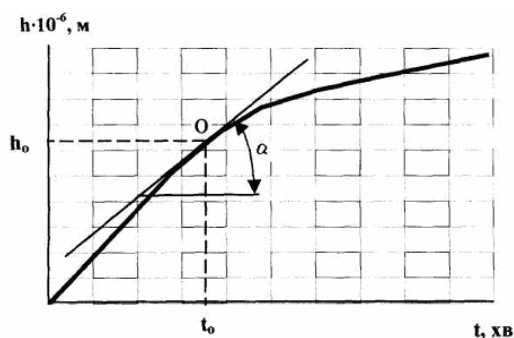
Таким чином, розроблений спосіб може бути застосований для визначення ефективного радіусу пор склотканного наповнювача  $r_{\text{еф}}$  за формулами (6) або (7), а також залежностей  $r_{\text{еф}} = f(N)$  за формулою (9), тобто бути використаним при моделюванні реального технологічного процесу просочування.

Крім того, використання способу, що пропонується, дозволяє підвищити точність та ефективність визначення ефективного радіуса пор

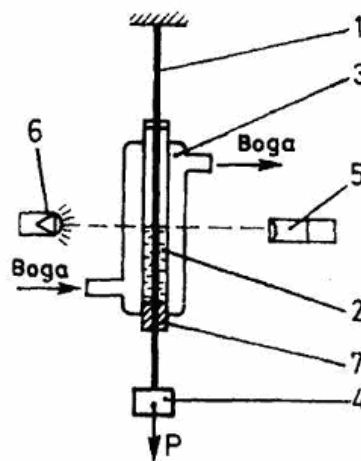
у залежності від зусилля натягнення наповнювача при просочуванні для полімерних композиційних матеріалів на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів регулярної структури та полімерних (реактопластичних) зв'язуючих.

Джерела інформації

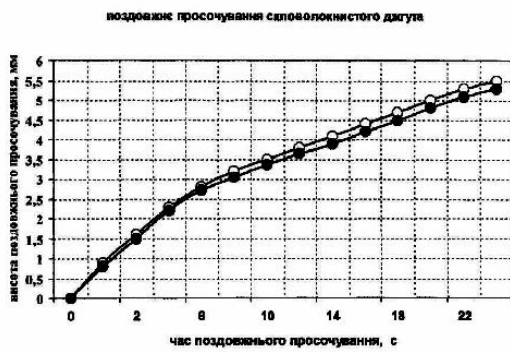
1. Прохоренко П.П., Довгялло Г.И., Корнев А.П., Мигун Н.П. Способ измерения эффективного радиуса пор в пористых изделиях. Авторское свидетельство СССР № 1742681. МКИ G 01 N 15/08. Опубл. в Б.И. №23, 1992 г.
2. Чизмазджев Ю.А., Маркин В.С., Тарасевич М.Р., Чирков Ю.Г. Макрокинетика процессов в пористых средах. - М.: Наука, 1971. - 364 с.
3. Воюцкий С.С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров. - Л.: Химия, 1969. - 336 с.
4. Статюха Г.О., Петрань А.Г. Розробка комп'ютерної системи підготовки та обробки даних у межах застосування експериментально-статистичної методології для хіміко-технологічних систем//Наукові вісті НТУУ "КШ". - 2000. - №1. - С 100-106.
5. Насонкин Г.А. Введение в эволюционное экспериментально-статистическое моделирование технологического процесса. - К.: Корнійчук. 2002. - 68 с.
6. Бондар А.Г. Математическое моделирование в химической технологии. - К.: Вища школа, 1973. - 280 с.



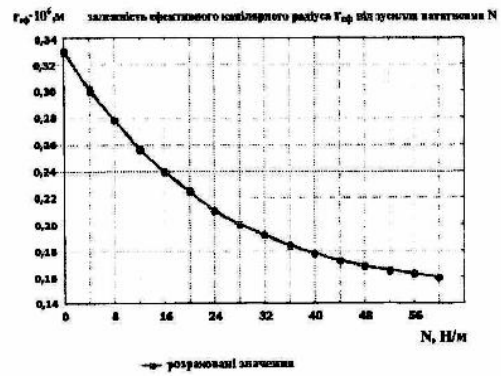
Фиг. 1



Фиг. 2



Фіг. 3



Фіг. 4