УДК 667.64:678.026

Дослідження повзучості в агресивних середовищах епоксидних композитів із безперервними волокнами і модифікованим дисперсним наповнювачем

А. В. Букетов[а], П. Д. Стухляк[б], В. В. Левицький[б], М. А. Долгов[в], І. Г. Добротвор[б]

[а] Херсонський морський університет, Херсон, Україна

[б] Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

[в] Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Досліджено вплив модифікування дисперсного наповнювача епоксидним олігомером і композицій ультрафіолетом на повзучість матеріалів, що містять скляні та базальтові тканини, в умовах впливу агресивних середовищ. Встановлено, що для зменшення повзучості матеріалів необхідно використовувати двошарові епоксидні композитні "гібридні" матеріали, які містять скляні і базальтові тканини. Із метою підвищення експлуатаційних характеристик композитів у вигляді проміжного шару необхідно використовувати опромінений ультрафіолетом епоксидний зв'язувач, що містить модифіковані епоксидним олігомером дисперсні частинки наповнювача.

Ключові слова: епоксидний композит, дисперсний наповнювач, повзучість, агресивне середовище.

Вступ. Однією з найважливіших фізико-механічних властивостей епоксидних композитних матеріалів (КМ) і захисних покриттів на їх основі є повзучість в умовах впливу статичних та динамічних навантажень у процесі експлуатації технологічного устаткування. Найсуттєвіше повзучість матеріалів зростає під час їх експлуатації в умовах впливу агресивних середовищ. Установлено, що поліпшити властивості матеріалів і, як наслідок, зменшити їх повзучість в умовах впливу статичних і циклічних навантажень, градієнта температур можна шляхом використання "гібридних" епоксидних композитів із неперервними волокнами, що мають різну фізичну природу, та тканин на їх основі [1]. При формуванні композитів із підвищеними показниками фізико-механічних властивостей в основному використовують гібридні КМ з волокнами, що регулярно чергуються в одному шарі матеріалу або кожен шар композита сформовано з вмістом тканин різного типу [1]. Зазначимо, що при формуванні таких композитів і захисних покриттів на їх основі найчастіше використовують скляні, базальтові, вуглецеві, борні та металеві волокна або тканини.

Важливим при формуванні матеріалів із підвищеними експлуатаційними характеристиками, у тому числі і з невисокими показниками повзучості, є вибір олігомерного зв'язувача. Установлено, що використання епоксидної матриці забезпечує поліпшення адгезійних та когезійних властивостей КМ, які в основному визначають експлуатаційні характеристики при довготрива-

© А. В. БУКЕТОВ, П. Д. СТУХЛЯК, В. В. ЛЕВИЦЬКИЙ, М. А. ДОЛГОВ, І. Г. ДОБРОТВОР, 2011

лій експлуатації покриттів [2]. Окрім того, показано, що для покращання когезійної міцності у зв'язувач необхідно додатково вводити дисперсні наповнювачі, які попередньо модифікують епоксидним оліґомером [3]. Таке модифікування поверхні наповнювача збільшує його взаємодію з макромолекулами оліґомерного зв'язувача. У подальшому обробка епоксидних композицій з модифікованими частинками зовнішніми енергетичними полями, у тому числі й ультрафіолетовим опроміненням (УФО), забезпечує утворення активних радикалів у оліґомері, що поліпшує взаємодію на межі поділу фаз біля поверхні наповнювача. При цьому формується матеріал із поліпшеними когезійними властивостями, який доцільно використовувати як проміжний шар між тканинами для різного типу гібридних КМ. Це дозволяє зменшити повзучість композитів при їх експлуатації в агресивних середовищах.

Отже, при створенні двошарових покриттів важливим є формування одного шару, що знаходиться ближче до основи з демпфірувальними та релаксаційними характеристиками. Зовнішній шар у цьому випадку може нести інше функціональне навантаження: корозійну стійкість; зносостійкість; температуро- або теплопровідність та ін.

Мета роботи – дослідити вплив модифікування дисперсного наповнювача епоксидним оліґомером і композицій УФО на повзучість матеріалів, що містять скляні та базальтові тканини, в умовах агресивних середовищ.

Матеріали і методика досліджень. Об'єктом дослідження слугували композити на основі оліґомерного зв'язувача з таким відношенням компонентів:

епоксидно-діановий оліґомер марки ЕД-20 – 100 мас.ч;

пластифікатори: поліетероліґодиетеракрилат (ПДЕА-4) – 20 мас.ч, поліефірний лак (ПЕ-220) – 10 мас.ч.

Як твердник використано поліетиленполіамін (ПЕПА) – 13 мас.ч, завдяки якому композити затвердівають при кімнатній температурі, що доцільно при нанесенні покриттів на складні поверхні деталей технологічного устаткування.

Для поліпшення експлуатаційних характеристик КМ у композицію вводили наповнювачі: коричневий шлам (КШ) і оксид міді (80 мас.ч на 100 мас.ч епоксидної смоли) з дисперсністю 63 мкм. Коричневий шлам є сумішшю оксидів (мас.ч): заліза – 46...48; алюмінію – 7...9; кремнію – 12...14; кальцію – 18...21; магнію – 1...2; титану – 4...7; ванадію – 1,5...2,5; олова – 0,9...1,6; барію – 0,7...1,0 та ін. (у сумі 100 мас.ч). Коричневий шлам є побічним продуктом у виробництві оксиду алюмінію, але відомий як активний наповнювач до епоксидного зв'язувача. Використання КШ дозволяє не тільки підвищити адсорбційну взаємодію на межі поділу фаз полімер–наповнювач, а й здешевити виготовлення композитних матеріалів та частково вирішити проблему їх утилізації.

Для поліпшення взаємодії полімеру з наповнювачем використовували спосіб модифікування композиції, що складається з двох етапів:

модифікування частинок наповнювача епоксидним діановим оліґомером ЕД-20 і термообробка при $T = (353 \pm 2)$ К протягом $t = (30 \pm 2)$ хв;

ультрафіолетове опромінення суміші модифікованих дисперсних частинок наповнювача та оліґомерної композиції до введення твердника [4].

Готували композицію за такою технологією. Частинки наповнювача вводили в епоксидну смолу і поєднували компоненти без твердника протягом 4-5 хв. Потім на фільтрувальний папір наносили композицію з мінімально можливою товщиною шару 80...100 мкм. Далі суміш термообробляли для видалення надмірної кількості епоксидного зв'язувача. Ваговим методом установлено, що вміст епоксидної смоли на поверхні дисперсних частинок після їх модифікування оліґомером за описаною методикою становить 8...12 мас.ч на 100 мас.ч дисперсного наповнювача.

Ультрафіолетове опромінення композицій проводили за допомогою спеціально розробленого ультрафіолетового випромінювача з використанням бактерицидної лампи ДРБ-8-1. Довжина хвилі ультрафіолетових променів становила 254 нм, робоча напруга – 220 В, частота струму – 50 Гц, потужність – 15 Вт. Тривалість опромінення композицій (без твердника) $t = (20 \pm 0{,}2)$ хв. Маса опромінених композицій сягала (200 ± 10) г. Опромінювали композицію, що мала товщину шару $h = 25...30$ мм.

Як армуючий наповнювач використовували скляні [5] та базальтові [3, 6] тканини. Фізико-механічні властивості безперервних волокон у тканинах, з яких формували шари у гібридних КМ, наведено у табл. 1.

Т а б л и ц я 1

Фізико-механічні властивості волокон

Волокно	Щільність, кг/м^3	Діаметр волокна d, мкм	Міцність (на розрив), МПа	Модуль пружності, ГПа	Водопоглинання, %
Скляне	2500	10...12	2200...2600	70	0,20
Базальтове	2700	9...11	2200...2800	100...110	0,01

Досліджувані зразки, що містять два шари окремо вибраних тканин, між якими вводили епоксидну композицію з дисперсним наповнювачем, формували під пресом із силою навантаження $F = 60$ Н протягом $t = 72$ годин при температурі $T = (293 \pm 2)$ К. При цьому відбувається просякнення тканин по всій товщині. Розміри зразків наступні: довжина $L = 120$ мм; ширина $b = 15$ мм; висота $h = 0{,}1$–$0{,}2$ мм. Схему формування зразків для дослідження повзучості матеріалів наведено на рис. 1.

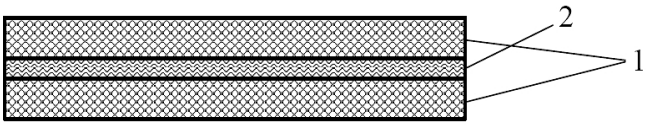


Рис. 1. Схема формування зразків для дослідження повзучості матеріалів: *1* – скляна або базальтова тканина; *2* – епоксидна матриця або опромінений ультрафіолетом композит із модифікованими частинками наповнювача.

Виходячи з умов експлуатації технологічного устаткування із захисними покриттями, епоксикомпозити досліджували у агресивних середовищах: дощовий розчин і нафта-сирець. Окрім того, за результатами попередніх досліджень впливу природи модифікованого епоксидним оліґомером дисперсного наповнювача і УФО композицій на швидкість та ступінь зшивання КМ, які

містять волокна, встановлено, що при використанні скляних волокон для отримання матеріалів із підвищеними показниками когезійної міцності у епоксидну композицію необхідно вводити частинки КШ [3]. Аналогічно при використанні базальтових волокон у епоксидну композицію вводяться частинки оксиду міді [7]. У роботі досліджували повзучість в умовах агресивних середовищ гібридних епоксидних композитів, сформованих за такими варіантами:

I – композит на основі скляної тканини й епоксидної матриці;

II – композит на основі базальтової тканини й епоксидної матриці;

III – композит на основі скляної тканини та композиції, що містить частинки КШ;

IV – композит на основі скляної і базальтової тканини та композиції, що містить частинки оксиду міді;

V – композит на основі базальтової тканини та композиції, що містить частинки оксиду міді;

VI – композит на основі скляної і базальтової тканини та композиції, що містить частинки КШ.

При дослідженні повзучості композитних матеріалів використовували методику при експериментально встановленому статичному навантаженні $F = 2$ Н [8, 9]. Схему пристрою для дослідження повзучості матеріалів наведено на рис. 2. Зазначимо, що досліджували матеріали протягом 72 годин, при цьому визначали абсолютне значення прогину зразка під навантаженням у конкретні моменти часу.

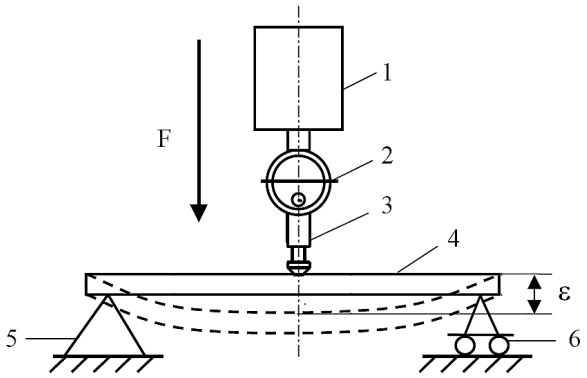


Рис. 2. Схема пристрою для дослідження повзучості матеріалів: *1* – несучий вантаж; *2* – індикатор; *3* – індентор; *4* – зразок; *5* – нерухома опора; *6* – рухома опора.

Відносну деформацію зразків визначали на основі початкового і кінцевого (або проміжного) значення прогину зразка за формулою

$$\varepsilon = \frac{l_{\text{к}} - l_{\text{п}}}{l_{\text{к}}} \cdot 100\%,$$

де $l_{\text{п}}$ – абсолютне значення прогину зразка після навантаження на початку досліджень; $l_{\text{к}}$ – абсолютне значення прогину зразка після навантаження у кінці (або на проміжному етапі) досліджень.

Швидкість повзучості знаходили за формулою

$$V_{\text{п}} = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{t_2 - t_1},$$

де $\varepsilon(t_2)$, $\varepsilon(t_1)$ – відносна деформація матеріалів у моменти часу t_2 і t_1 відповідно.

Модуль повзучості визначали так:

$$E_{\text{п}} = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)},$$

де σ – напруження, що діють на дослідний зразок.

Здатність до повзучості визначали за формулою

$$J_{\text{п}} = \frac{1}{E_{\text{п}}}.$$

Показник відновлення після повзучості знаходили таким чином:

$$R = \frac{l_{\text{к}} - l(t)}{l_{\text{к}} - l_{\text{п}}} \cdot 100\%,$$

де $l(t)$ – абсолютне значення прогину зразка у момент часу t.

При аналізі результатів повзучості композитів виходили з того, що матеріал якісно оцінювали як єдине ціле. Тобто детально не враховували характеристики окремих шарів, а усереднювали їх для всього шаруватого композитного матеріалу. Результати експериментальних і розрахункових досліджень характеристик повзучості гібридних композитів наведено нижче. Водночас зазначимо, що під терміном гібридні композити будемо розуміти матеріали, сформовані пошарово з різних видів тканин: один шар – це тканина одного виду [1].

Обговорення експериментальних результатів дослідження. На першому етапі досліджували повзучість КМ у дощовому розчині. Експериментально встановлено, що прогин зразків $l_{\text{п}}$, які містять лише скляну тканину та ненаповнену пластифіковану епоксидну матрицю, на початку дослідження становив $1{,}18 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 3, табл. 2). Для КМ, сформованих на основі базальтової тканини і ненаповненої пластифікованої епоксидної матриці, $l_{\text{п}} = 1{,}03 \cdot 10^{-3}$ м. Наповнення епоксидної композиції дисперсними частинками КШ і CuO та формування гібридних композитів, тобто створення КМ, які одночасно містять скляну і базальтову тканини, забезпечують зменшення початкового прогину зразків на 26...60% у залежності від природи дисперсних частинок і типу тканини. Зазначимо, що найменший прогин зразків ($0{,}42 \cdot 10^{-3}$ м) на початку дослідження в умовах агресивного середовища дощовий розчин мають гібридні матеріали, сформовані за варіантом VI. Це свідчить про підвищені

показники їх когезійної міцності порівняно з іншими досліджуваними композитами, що у першу чергу зумовлено поліпшенням властивостей матеріалів внаслідок використання шарів із тканин різного типу (скляна і базальтова).

Таблиця 2

Вплив типу тканин і модифікованого дисперсного наповнювача на повзучість опромінених ультрафіолетом епоксикомпозитів в умовах агресивного середовища (дощовий розчин)

Варіанти формування композитів	$l_{\text{п}}$, м	$V_{\text{п}} \cdot 10^{-3}$, %/години	$E_{\text{п}}(t) \cdot 10^{3}$, Па	$J_{\text{п}}(t) \cdot 10^{-6}$, Па^{-1}	R, %
I	0,00118	6,7	270	3,7	12,3
II	0,00103	5,9	304	3,3	14,1
III	0,00087	4,3	419	2,4	28,6
IV	0,00057	4,6	378	2,6	37,1
V	0,00078	4,5	405	2,5	32,5
VI	0,00042	3,6	496	2,0	35,4

Примітка. Тут і в табл. 3 характеристики повзучості матеріалів наведено при їх дослідженні протягом 72 години.

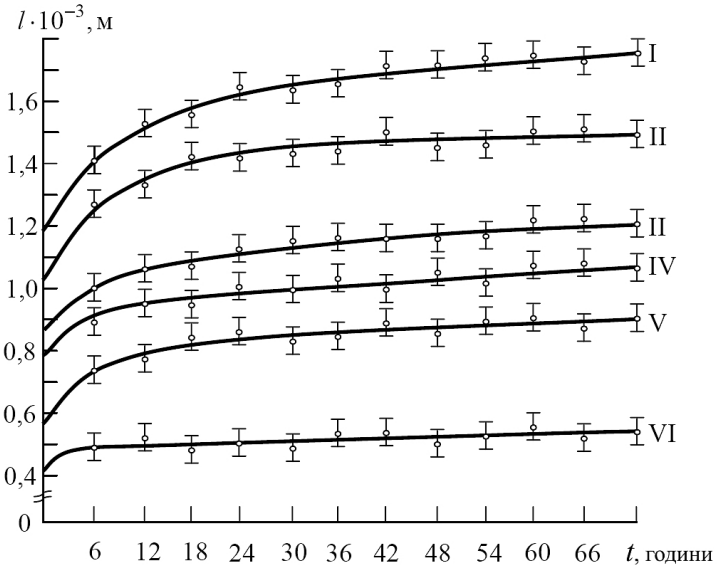
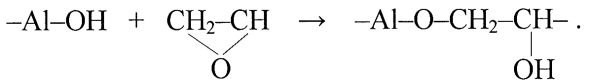


Рис. 3. Залежність абсолютної деформації від тривалості впливу статичного навантаження ($F = 2$ Н) у сформованих на основі скляної і базальтової тканин композитах, що містять 80 мас.ч дисперсного наповнювача на 100 мас.ч епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин). (Тут і на рис. 4–6: I–VI – варіанти формування композитів.)

У [10] доведено, що формування міжшарових гібридних матеріалів, тобто таких, які містять шари з тканин або волокон різної природи, сприяє значному підвищенню міцності КМ за рахунок синергічного ефекту. Наявність цього ефекту пояснюють збільшенням жорсткості шарів композитів, особливо

віддалених від осьової площини матеріалу, і зумовлений він зміною перебігу фізичних процесів при структуроутворенні матеріалів, наповнених тканинами різної природи. Зокрема, доведено, що внаслідок модифікування наповнювача і подальшого УФО композицій поліпшується взаємодія макромолекул зв'язувача і активних радикалів, які утворились у об'ємі оліґомеру в результаті опромінення, не тільки з активними центрами на поверхні дисперсного наповнювача, а й на поверхні волокон [3, 4]. У цьому аспекті цікавим із практичної точки зору є наповнення матеріалів тканинами різної природи. Дослідження структури базальтових волокон методами ІЧ-спектроскопії показують, що матеріал поверхневих шарів волокон характеризується значною концентрацією катіонів Me або Al^{3+} [11, 12]. Для скляних волокон спостерігається зворотний ефект: вміст катіонів Me на поверхні доволі низький. Відомо, що хімічна взаємодія відбувається між епоксидними групами полімерної матриці і оксидною плівкою на поверхні волокон та дисперсними частинками [6]:



Це свідчить про різний механізм взаємодії скляних і базальтових волокон із макромолекулами та радикалами епоксидного зв'язувача. При використанні базальтових волокон у взаємодії з ланцюгами макромолекул і радикалами в основному беруть участь катіони Me, у той час як при використанні скляних волокон взаємодія в основному визначається рекомбінацією катіонів Al^{3+} із молекулами кисню ланцюга макромолекул або радикалів епоксидного оліґомеру.

Отже, наповнення КМ різного виду тканинами призводить до активації і перебігу фізико-хімічних процесів, що мають різну природу. Це, у свою чергу, збільшує міжфазову взаємодію, що зумовлює синергічний ефект у підвищенні когезійної міцності епоксикомпозитів. Із урахуванням вищенаведених положень і результатів дослідження впливу природи тканин на експлуатаційні характеристики матеріалів [3] зовнішній шар формували на основі базальтової тканини (варіанти V і VI).

Окрім того, попередньо показано, що введення у епоксидний зв'язувач частинок КШ при одночасному використанні скляних або базальтових волокон забезпечує формування композитів із порівняно невисокими показниками тангенса кута механічних втрат під час структуроутворення матеріалів, що додатково свідчить про їх високу когезійну міцність [4, 7].

При аналізі повзучості гібридних матеріалів можна стверджувати, що протягом усього часу досліджень відбувається деформування композитів з одночасним руйнуванням фізичних зв'язків структурної сітки матриці, про що свідчить зростання прогину зразків і їх деформації. Отже, можна констатувати, що матеріали з високими показниками когезійної міцності, гібридні КМ, сформовані за варіантами III–VI, характеризуються незначною повзучістю.

Високі показники прогину у КМ, сформованих за варіантами I і II, зумовлені їх незначною когезійною міцністю, внаслідок чого проявляється

ефект Ребіндера [13]. Установлено, що у процесі навантаження (у нашому випадку статичного) у композиті виникають напруження розтягу у нижній частині зразка і стиску у верхній його частині. Відбувається руйнування зв'язків на межі поділу фаз дисперсний наповнювач–матриця, волокно–матриця або в об'ємі самої матриці. З урахуванням того, що зразки досліджували в агресивному середовищі дощового розчину, можна стверджувати про проникнення у процесі дослідження молекул води в об'єм композитів. Таким чином відбувається набухання композитних матеріалів. Молекули води, які утримуються у мікротріщинах матеріалу, тобто у місцях розриву зв'язків, зумовлюють "розклинювання", що спричиняє подальше його руйнування.

Експериментально встановлено, що на початкових етапах досліджень найвищу швидкість повзучості ($V_{\text{п}} = (31...43)\cdot 10^{-3}$ %/години) мають КМ, сформовані на основі скляних або базальтових тканин (варіанти I і II) та на основі базальтової тканини і наповнювача оксиду міді (варіант V) – рис. 4. Водночас експериментальні дослідження показують, що для гібридних КМ, сформованих за варіантами III, IV і VI, на початковому етапі (протягом 6 годин дослідження) швидкість повзучості знаходиться у межах $V_{\text{п}} = (23...26)\times$ $\times 10^{-3}$ %/години. При подальших дослідженнях протягом 72 годин встановлено, що найменша швидкість повзучості характерна для матеріалів, сформованих за варіантом VI ($V_{\text{п}} = 3{,}6\cdot 10^{-3}$ %/години) – табл. 2.

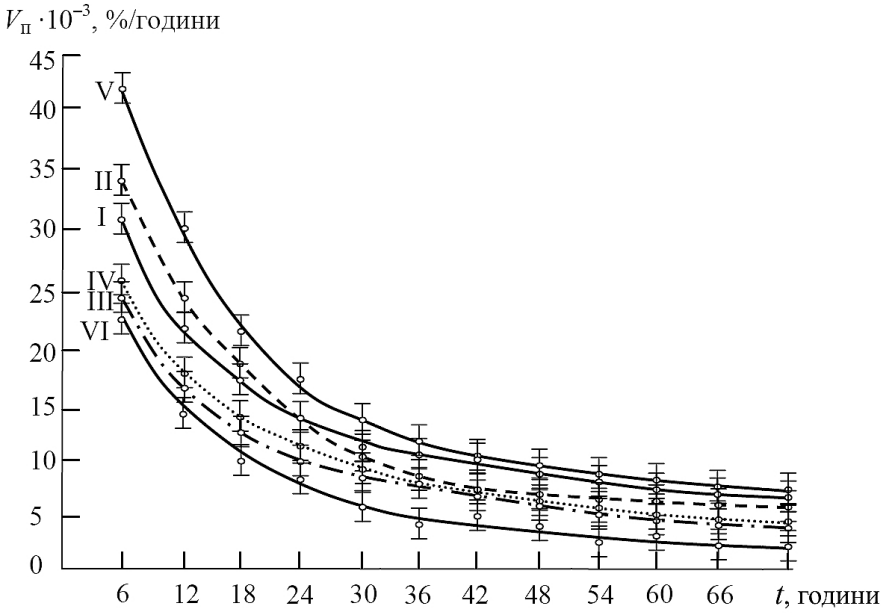


Рис. 4. Залежність швидкості повзучості від тривалості впливу статичного навантаження ($F = 2$ Н) у сформованих на основі скляної і базальтової тканин композитах, що містять 80 мас.ч дисперсного наповнювача на 100 мас.ч епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин).

Надалі демпфірувальні властивості матеріалів досліджували при обчисленні модуля повзучості $E_{\text{п}}$ і здатності до повзучості $J_{\text{п}}$ гібридних композитів (табл. 2). Установлено, що серед досліджуваних КМ найнижчі пока-

зники модуля повзучості ($E_{\text{п}} = 270 \cdot 10^3$ і $304 \cdot 10^3$ Па), а отже, і найбільшу здатність до повзучості ($J_{\text{п}} = 3{,}7 \cdot 10^{-6}$ і $3{,}3 \cdot 10^{-6}$ Па$^{-1}$) мають матеріали, сформовані за варіантами I і II відповідно. Матеріал, що містить скляну і базальтову тканини (варіант VI), та композиції з частинками КШ мають максимальне значення модуля повзучості ($E_{\text{п}} = 496 \cdot 10^3$ Па) і найменшу здатність до повзучості ($J_{\text{п}} = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ Па$^{-1}$). Зазначимо, що отримані результати корелюють із даними досліджень швидкості повзучості і відносної деформації КМ. Найвищі показники модуля повзучості і найменші значення швидкості повзучості та відносної деформації характерні для гібридних КМ, сформованих за варіантом VI. Це свідчить про їх високі когезійні характеристики при введенні модифікованого дисперсного наповнювача і тканин відповідного типу.

Після зняття навантаження визначали можливість епоксикомпозитного матеріалу відновлювати початкову форму. Низький ступінь відновлення свідчить про значний відсоток кількості зруйнованих хімічних зв'язків у просторовій сітці, що утворена макромолекулами зв'язувача. Це зумовлює суттєву пластичну деформацію матеріалу. Тому можна констатувати невелику когезійну міцність системи таких композитів, що підтверджується дослідженнями [14–18]. Повернення зразка у початкову форму після зняття навантаження свідчить про пружні властивості матеріалу, що дозволяє говорити про його високі когезійні характеристики. Отже, у такому випадку формується система, яка під впливом заданого навантаження практично деформується лише у пружній області і у подальшому характеризується високими експлуатаційними характеристиками. Установлено, що найкращі показники відновлення R після зняття навантаження у дощовому розчині мають гібридні КМ, які містять скляну і базальтову тканину та зв'язувач із модифікованими епоксидним оліґомером дисперсними частинками ($R = 28{,}6...35{,}4\%$) – табл. 2. Це вказує на високі характеристики пружності таких композитів. Установлено, що після витримки зразків під навантаженням протягом усього часу досліджень кількість зруйнованих зв'язків на межі поділу фаз і в об'ємі композита є незначною.

Отже, на основі проведених досліджень гібридних КМ в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин) показано, що найменші показники повзучості мають матеріали на основі скляної і базальтової тканини й опроміненої ультрафіолетом композиції, яка містить модифіковані епоксидним оліґомером частинки КШ.

Досліджували повзучість КМ в агресивному середовищі (нафта-сирець). Найбільшими показниками початкового прогину характеризуються матеріали, сформовані за варіантами I і II (рис. 5), у той час як найменшими ($l_{\text{п}} = 0{,}58 \cdot 10^{-3}$ і $0{,}78 \cdot 10^{-3}$ м) – композити, сформовані за варіантами V і VI відповідно (табл. 3). Результати дослідження показують, що найменшу швидкість повзучості мають матеріали, що містять базальтові тканини і модифікований наповнювач оксид міді (рис. 6). Для них також характерні максимальний модуль повзучості ($E_{\text{п}} = 290 \cdot 10^3$ Па) і найменша здатність до повзучості ($J_{\text{п}} = 3{,}4 \cdot 10^{-6}$ Па$^{-1}$) – табл. 3.

Т а б л и ц я 3

Вплив типу тканини і модифікованого дисперсного наповнювача на повзучість опромінених ультрафіолетом епоксикомпозитів в умовах агресивного середовища (нафта-сирець)

Варіанти формування композитів	$l_{\text{п}}$, м	$V_{\text{п}} \cdot 10^{-3}$, %/години	$E_{\text{п}}(t) \cdot 10^{3}$, Па	$J_{\text{п}}(t) \cdot 10^{-6}$, Па^{-1}	R, %
I	0,00108	7,9	226	4,4	7,4
II	0,00088	10,3	175	5,7	6,3
III	0,00044	7,3	249	4,0	24,3
IV	0,00062	8,5	212	4,7	10,6
V	0,00058	6,2	290	3,4	27,4
VI	0,00078	6,5	279	3,6	28,0

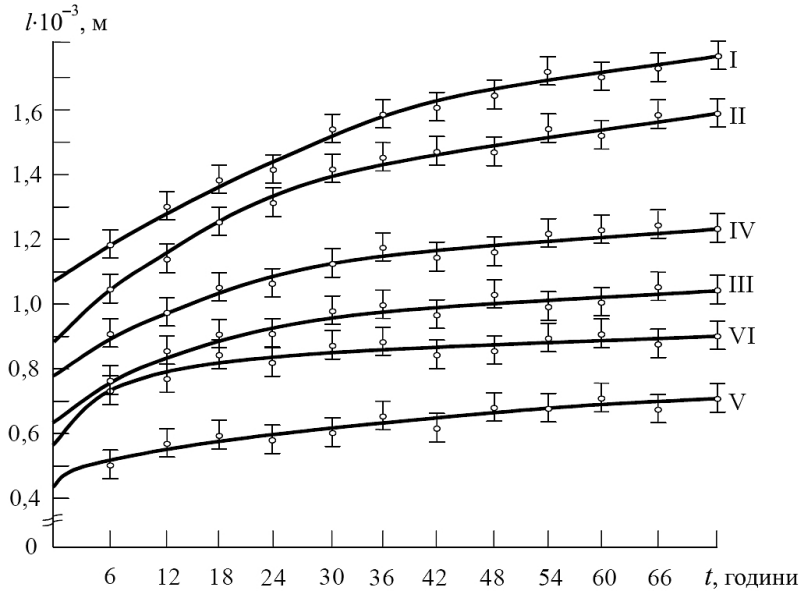


Рис. 5. Залежність абсолютної деформації від тривалості впливу статичного навантаження ($F = 2$ Н) у сформованих на основі скляної і базальтової тканин композитах, що містять 80 мас.ч дисперсного наповнювача на 100 мас.ч епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (нафта-сирець).

Дослідження показника відновлення КМ після повзучості свідчать, що матеріали, сформовані за варіантом V ($R = 27{,}4\%$), мають значну когезійну міцність. У процесі статичного навантаження у прийнятому часовому діапазоні дослідження деформація відмічалася лише у пружній області матеріалу. Композит на основі базальтової тканини й опроміненої ультрафіолетом композиції, що містить модифіковані епоксидним олігомером частинки оксиду міді, можна рекомендувати для формування захисних покриттів на деталях та вузлах технологічного устаткування, яке експлуатується в умовах впливу агресивного середовища (нафта-сирець).

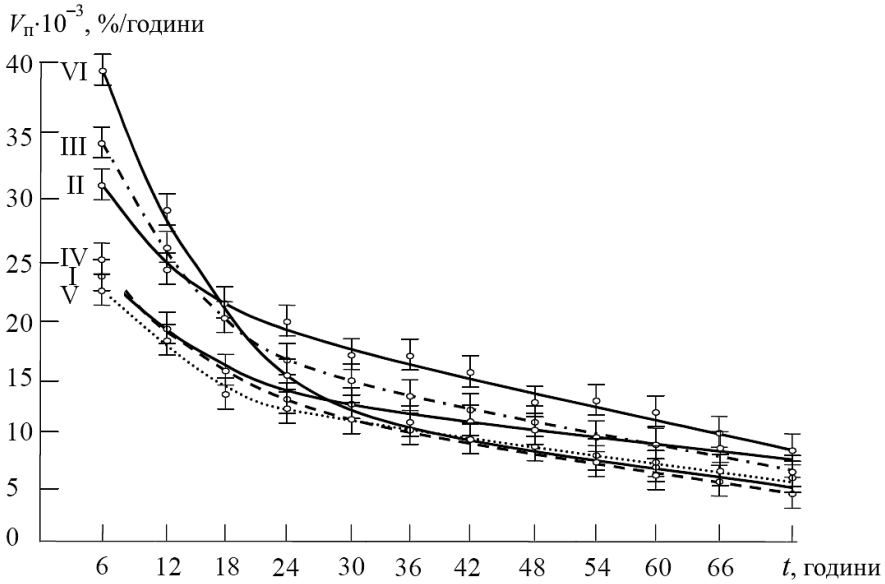


Рис. 6. Залежність швидкості повзучості від тривалості впливу статичного навантаження ($F = 2$ Н) у сформованих на основі скляної і базальтової тканин композитах, що містять 80 мас.ч дисперсного наповнювача на 100 мас.ч епоксидної смоли в умовах впливу агресивного середовища (нафта-сирець).

Висновки

1. Установлено, що для зменшення повзучості матеріалів, особливо в умовах впливу агресивних середовищ, необхідно використовувати двошарові епоксидні композитні гібридні матеріали, що містять скляні і базальтові тканини.

2. Із метою підвищення експлуатаційних характеристик композитів як проміжний шар слід використовувати опромінений ультрафіолетом пластифікований епоксидний зв'язувач, що містить попередньо модифіковані епоксидним оліґомером дисперсні частинки наповнювача.

3. На основі проведених досліджень гібридних композитів в умовах впливу агресивного середовища (дощовий розчин) установлено, що найменші показники повзучості мають матеріали на основі скляної і базальтової тканини й опроміненої ультрафіолетом композиції, яка містить модифіковані епоксидним оліґомером частинки КШ. Такі матеріали мають незначні показники початкового прогину при навантаженні ($l_п = 0{,}42 \cdot 10^{-3}$ м) і швидкості повзучості ($V_п = 3{,}6 \cdot 10^{-3}$ %/години).

4. На основі результатів випробувань для захисту устаткування, яке експлуатується в агресивному середовищі (нафта-сирець), рекомендуються композити на основі базальтової тканини й опроміненої ультрафіолетом композиції, що містить модифіковані епоксидним оліґомером частинки оксиду міді. Для таких матеріалів характерний максимальний модуль повзучості ($E_п = 290 \cdot 10^3$ Па) і найменша здатність до повзучості ($J_п = 3{,}4 \cdot 10^{-6}$ $Па^{-1}$).

Р е з ю м е

Исследовано влияние модификации дисперсного наполнителя эпоксидным олигомером и композиций ультрафиолетом на ползучесть материалов, наполненных стеклянными и базальтовыми тканями, в условиях влияния агрессивных сред. Установлено, что для уменьшения ползучести материалов необходимо использовать двухслойные эпоксидные композитные "гибридные" материалы, которые содержат стеклянные и базальтовые ткани. С целью повышения эксплуатационных характеристик композитов в виде промежуточного слоя следует использовать облученное ультрафиолетом эпоксидное связующее, которое содержит модифицированные эпоксидным олигомером дисперсные частицы наполнителя.

1. *Справочник* по композиционным материалам. В 2 кн. Кн. 1 / Под ред. Дж. Любина: Пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта под ред. Б. Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
2. *Князев В. К*. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1977. – 179 с.
3. *Стухляк П. Д*., *Букетов А. В*., *Добротвор І. Г*. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.
4. *Стухляк П. Д*., *Букетов А. В*., *Левицький В. В*. Епоксидні композити. Дослідження механізму впливу технології формування на властивості // Хім. пром-сть України. – 2004. – № 5. – С. 17 – 23.
5. *Непрерывное* стеклянное волокно. Основа технологии и свойства / Под ред. М. Г. Черняка. – М.: Химия, 1965. – 320 с.
6. *Джигирис Д. Д*., *Махова М. Ф*., *Горобинская В. Д*., *Бомбарь Л. И*. Непрерывное базальтовое волокно // Стекло и керамика. – 1983. – № 9. – С. 14 – 18.
7. *Букетов А. В*., *Стухляк П. Д*., *Левицький В. В. та ін*. Дослідження комплексного впливу скляних волокон і дисперсних наповнювачів на процеси зшивання епоксикомпозитів // Вопр. химии и хим. технологии. – 2007. – № 3. – С. 90 – 95.
8. *Практикум* по полимерному материаловедению / Под ред. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 256 с.
9. *Патент № 65902*, Україна, МПК G01B7/16. Установка для вимірювання фізико-механічних характеристик матеріалів при згині / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, А. Г. Микитишин. – Чинний з 15.04.2004.
10. *Chamis C. C. and Lark R. F*. Hybrid composites – state-of-the-art review: Analysis, design, application and fabrication // 18th AIAA SDV Conf. (San Diego, CA, 21–23 March, 1977). – P. 311 – 331.
11. *Адамсон А. А*. Физическая химия поверхности. – М.: Мир, 1981. – 568 с.
12. *Скола Д*. Высокомодульные волокна и поверхность раздела в полимерных волокнистых композитах // Композиционные материалы. В 6 т.

Т. 6. Поверхности раздела в полимерных композитах. – М.: Мир, 1978. – С. 228 – 291.

13. *Богданович П. Н.*, *Прущак В. Я.* Трение и износ в машинах. – Минск: Выш. шк., 1999. – 376 с.
14. *Kal'ba E. M.*, *Buketov A. V.*, *Savchuk P. P.*, *and Holotenko S. M.* Adhesion strength of polymer-containing protective coatings // Mater. Sci. Chem. Mater. Sci. – 1999. – **35**, No. 1. – P. 125 – 128.
15. *Akinci A.* Mechanical and morphological properties of basalt filled polymer matrix composites // Mater. Sci. Eng. – 2009. – **35**, No. 1. – P. 29 – 32.
16. *Akinci A.*, *Akbulut H.*, *and Yilmaz F.* Mechanical properties of cost-effective polypropylene composites filled with red-mud particles // Polymers & Polymer Comp. – 2008. – **16**, No. 7. – P. 439 – 446.
17. *Стухляк П. Д.*, *Букетов А. В.* Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням. – Тернопіль: Збруч, 2009. – 237 с.
18. *Букетов А. В.*, *Стухляк П. Д.*, *Добротвор І. Г. та ін.* Вплив природи наповнювачів і ультрафіолетового опромінення на механічні властивості епоксикомпозитних покриттів // Пробл. прочности. – 2009. – № 4. – С. 117 – 123.

Поступила 19. 11. 2008