

Покращуйте дослідження та розробку композитів за допомогою аналізу матеріалів

Посібник з визначення характеристик складних композитних матеріалів

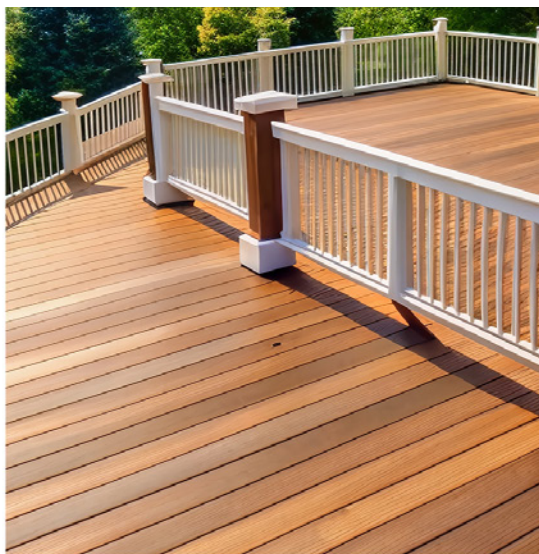


Waters™



Зміст

Вступ	2
Кількісне визначення густини зшивання полімерів за допомогою реологічних та DMA-вимірювань	3
Визначення ступеня отвердіння композиту	6
Втомна поведінка тканих склопластикових композитів при деформаціях згину при підвищених температурах	7



ВСТУП

Композитні пластикові матеріали знаходяться на передньому краї промислових інновацій, пропонуючи безпрецедентні переваги, які змінюють виробничі парадигми. Їхня легкість у поєднанні з винятковою міцністю робить їх незамінними в галузях, де експлуатаційні характеристики та ефективність мають першочергове значення. Від аерокосмічної до автомобільної промисловості ці матеріали дають внесок в енергозбереження та збільшення терміну служби виробів, сприяючи сталому розвитку в галузевих практиках.

Універсальність композитних пластмас дозволяє створювати індивідуальні властивості, такі як підвищена термостійкість або електропровідність, відкриваючи нові шляхи для специфічних рішень в конкретних застосуваннях. Крім того, їхня стійкість до корозії та зносу подовжує життєвий цикл компонентів, зменшуючи витрати на обслуговування та час простою. Оскільки промисловість прагне до передових досягнень, композитні пластмаси стають ключовим фактором, що сприяє розробці продуктів наступного покоління, які задовольняють зростаючі потреби технологій і суспільства.

Для характеристики складу, поведінки та фізичних властивостей цих матеріалів зазвичай використовують різні методи термічного, реологічного та механічного аналізу. Вони допомагають дати відповіді на наступні питання:

- Чи повністю отвердів мій композит?
- Як кінетика отвердіння вплине на виробництво?
- Чи буде цей композит безпечно працювати в моєму застосуванні?
- Чи впливає на термін служби виробу структура та процес виробництва мого композиту?

Реологія - це наука про плин і деформацію матеріалів під дією напруження, яка відіграє вирішальну роль у розумінні того, як оптимізувати обробку композитів. Завдяки широкому спектру методів вивчення реологічних характеристик можна отримати достовірну картину поведінки матеріалів в різних умовах, таких як атмосфера і температура.

Диференціальна сканувальна калориметрія (DSC) - це термоаналітичний метод, який дозволяє вимірювати кількість енергії, що поглинається або виділяється матеріалом при нагріванні, охолодженні або утриманні при постійній температурі. Він широко використовується для вивчення кінетики отвердіння композитних матеріалів шляхом моніторингу теплового потоку, пов'язаного з реакціями полімеризації під час процесу отвердіння. Аналізуючи термограми DSC, дослідники можуть визначити оптимальний цикл отвердіння, оцінити ступінь отвердіння та зрозуміти вплив різних рецептур на поведінку композитів при затвердінні.

Механічний аналіз охоплює три основні підходи: монотонні випробування, випробування на втому та динамічний механічний аналіз (DMA). Монотонне випробування, яке часто називають випробуванням на розтягнення до руйнування, вимірює подовження матеріалу та міцність на розрив, які використовуються для інтерпретації здатності матеріалу розтягуватися без втрати міцності, а також для визначення точки остаточного руйнування. DMA - це метод, який використовується для вивчення в'язкопружної поведінки композитів. Нарешті, при випробуванні на втому до матеріалу прикладається циклічне зусилля, що дозволяє оцінити його строк служби за певних умов. Оскільки технології обробки змінюються та розвиваються, важливо розуміти їхній вплив на кінцевий термін служби деталі. Втомну довговічність неможливо визначити за допомогою простих монотонних методів, тому випробування на втому стають обов'язковими.

Використання цих методів дозволяє дослідникам краще вибирати та розуміти композити, а інженерам-технологам - підвищувати їхню технологічність. Дізнайтеся, як передові аналітичні прилади допомагають покращити процес вибору матеріалів.

Політика TA Instruments

TA Instruments розуміє вимоги, які висувуються до оцінки нових композитних матеріалів для забезпечення можливості їх розширеного застосування. Ваші дослідження потребують точних, практичних методів вимірювань, щоб максимально скоротити період розробки, зменшити витрати та пришвидшити вихід на ринок. TA Instruments пропонує найвищу надійність у поєднанні з найкращою в галузі підтримкою, щоб ви могли ефективно аналізувати композити для успішної обробки та проектування виробів.

Кількісне визначення густини зшивання полімерів за допомогою реологічних та DMA-вимірювань

Анотація

Термореактивні полімери (реактопласти) широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як електронна, автомобільна та аерокосмічна. Експлуатаційні характеристики термореактивних матеріалів сильно залежать від структури базового полімеру, умов обробки та складу наповнювачів. Поширеними прикладами реактопластів є епоксидні смоли, зшиті поліуретани та поліефіри, наповнені вулканізовані гумові еластomers, а також деякі формальдегідні пінопластові матеріали.

Ступінь зшивання в реактопластах є критичним параметром, який сильно впливає на механічну міцність і в'язко-пружність матеріалу. Для ненаповненого термореактивного полімеру відсоток зшивання (також званий густиною зшивання) можна кількісно розрахувати, використовуючи як реологічні, так і DMA-вимірювання. Ця примітка щодо застосування описує, як налаштувати метод реологічних випробувань для вимірювання динамічного (комплексного) модуля реактопласту в області плато гумоподібності та подальшого розрахунку густини зшивання.

Вступ до динамічного механічного аналізу

Динамічні коливальні випробування є дуже важливим методом для визначення характеристик термопластичних і термореактивних матеріалів. Зазвичай це найкращий спосіб визначити в'язкопружні властивості матеріалу, які можуть бути пов'язані з молекулярною структурою, технологічністю, кінетикою отвердіння для реактопластів і кінцевими експлуатаційними характеристиками кінцевого використання [1].

При динамічних випробуваннях матеріал деформується за синусоїдальним законом з певною частотою та поводить себе вимірювання напруження, яке при цьому виникає, або навпаки. Деформування за синусоїдальним законом та вимірювання результуючого напруження в режимі деформації зсуву проілюстровано на Рисунку 1. Тут: γ - зсувна деформація; σ - відповідне напруження, а ω - кутова частота

Відношення σ_0/γ_0 є комплексним модулем. Фазовий кут δ , який є зсувом між вхідним і вихідним синусоїдальними сигналами, відображає в'язкопружні властивості матеріалу. Якщо δ дорівнює 0 рад (0°), матеріал є суто пружним; якщо δ дорівнює $\pi/2$ рад (90°), матеріал є суто в'язким. Якщо $0 < \delta < \pi/2$ рад, матеріал є в'язкопружним.

При динамічному реологічному вимірюванні, якщо зразок являє собою рідину або м'яку речовину (наприклад, паста або гель), то його, як правило, розміщують між паралельними пластинами або конусом і пластиною. Якщо зразок є твердим, то його випробовують шляхом кручення. Всі реологічні випробування проводяться в режимі деформації зсуву, тому вимірюваний модуль визначається як G .

DMA використовується для вимірювання в'язкопружних властивостей твердотільних зразків. Форма зразка може бути різною, наприклад, тонка плівка, прямокутна пластинка тощо. Динамічні випробування проводяться в режимі лінійної деформації, наприклад, розтягнення, згинання або стиснення. Таким чином, модуль у випробуванні DMA визначається як E .

Ці модулі зв'язані рівнянням (1), де ν - коефіцієнт Пуассона матеріалу. Загалом коефіцієнт Пуассона для полімерних матеріалів знаходиться в межах від 0,3 до 0,5.

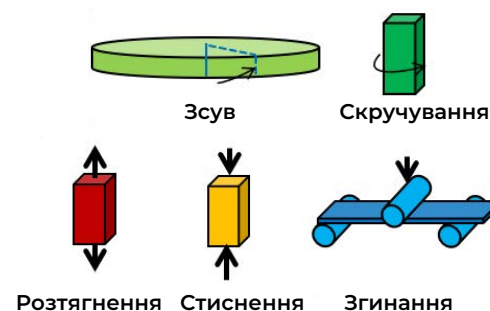
$$E = 2G(1+\nu). \quad (1)$$

Основні параметри, які можна отримати в результаті реологічних та динамічних випробувань DMA, наведені в Таблиці 1.

Типові динамічні випробування, які можна проводити на реометрі та DMA-аналізаторі, включають розгортку деформації/напруження, часову розгортку, частотну розгортку, безперервну лінійну зміну температури та покрокову зміну/розгортку температури.



Рисунок 1. Ілюстрація динамічних коливальних випробувань в режимі зсуву



Параметр	Символ	Рівняння
Комплексний модуль (Па)	G^*	σ_0/γ_0
	E^*	τ_0/ϵ_0
Модуль зберігання (Па)	G'	$G^*(\cos(\delta))$
	E'	$E^*(\cos(\delta))$
Модуль втрат (Па)	G''	$G^*(\sin(\delta))$
	E''	$E^*(\sin(\delta))$
Коефіцієнт втрат (коефіцієнт демпфування)	$\tan \delta$	$G''/G' = \sin(\delta)/\cos(\delta)$
		$E''/E' = \sin(\delta)/\cos(\delta)$
Комплексна в'язкість (Па-сек)	η^*	G^*/ω , де ω - кутова частота (рад/с)

Вимірювання та розрахунок густини зшивання термореактивного матеріалу

На Рисунку 2 показано результат динамічного випробування зразка лінійно-полімерного клею при лінійній зміні температури. Вимірювання проводилося для випадку деформації зсуву на реометрі з встановленими 8-мм паралельними пластинами. Температура змінювалась лінійно від -30 °C до 100 °C зі швидкістю нагрівання 3 °C/хв. Частота випробувань була встановлена на рівні 1 Гц з невеликою деформацією, яка знаходиться в межах лінійної в'язкопружної області зразка. Як видно з результатів випробувань, температура склування (T_g , на основі піку на кривій для $\tan(\delta)$) цього лінійного клейкого полімеру становить 16,33 °C. При температурах вище T_g модуль зберігання (G') полімеру демонструє плато в діапазоні від 40 °C до 70 °C. При температурі понад 70 °C цей полімер стає розплавленим, причому G'' перевищує G' , і зразок тече як в'язка рідина. Величина модуля в області плато гумоподібності (G_e) корелює із заплутаністю полімерних ланцюгів.

Якщо полімер частково зшитий, то його розплавлений стан не буде спостерігатися під час випробування при лінійному підвищенні температури. Після T_g область плато гумоподібності буде розширюватися до більш високих температур, поки полімер не почне розкладатися. На Рисунку 3 показано приклад результату випробування зразка частково зшитого клею при лінійному зростанні температури. Модуль зберігання залишається більшим за модуль втрат при температурах, вищих за нормальну температуру розплавлення незшитого полімеру. Для зшитого полімеру значення модуля зберігання в області плато гумоподібності корелює з кількістю зшивок у полімерному ланцюзі.

У літературі є ряд посилань на використання динамічного модуля, виміряного в області плато гумоподібності, для кількісного розрахунку густини зшивання полімерів [2,3]. По-перше, молекулярну масу ділянки полімерного ланцюга між вузлами зшивання можна розрахувати через величину G' , виміряну в області плато, використовуючи рівняння (2).

$$M_c = \frac{RTd}{G'_{\text{плато гумопод.}}} \quad (2)$$

Де M_c - молекулярна маса ділянки полімерного ланцюга між вузлами зшивання, R - універсальна газова стала, T - абсолютна температура, d - густина полімеру. Тоді густину зшивання полімеру можна розрахувати за допомогою рівняння (3)

$$q = \frac{M_w}{M_c} \quad (3)$$

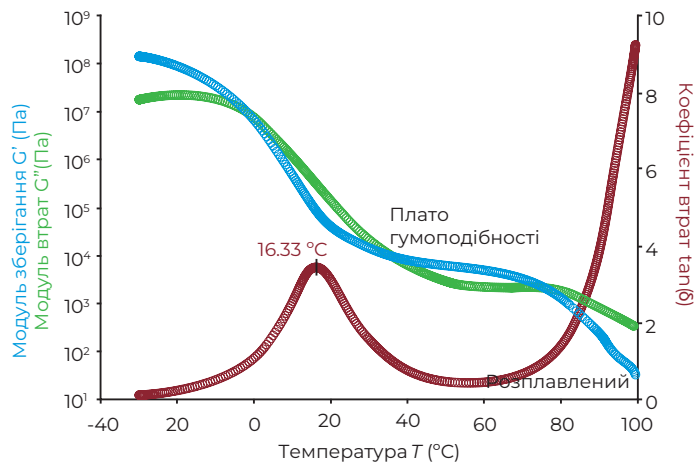


Рисунок 2. Результати динамічного випробування незшитого клею при лінійній зміні температури

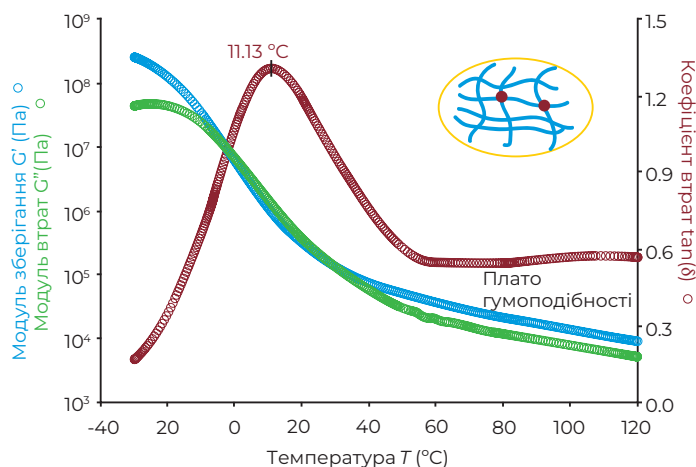


Рисунок 3. Результати динамічного випробування зшитого клею при лінійній зміні температури

Де M_w - молекулярна маса мономера, а q - густина зшивання. Як альтернатива, також повідомлялося про використання результатів DMA-випробувань для розрахунку густини зшивання [4]. Рівняння 4 базується на припущенні, що величина E в 3 рази більша за величину G , коли коефіцієнт Пуассона дорівнює 0,5.

$$M_c = \frac{3RTd}{E'_{\text{плато гумопод.}}} \quad (4)$$

На Рисунку 4 показані результати DMA-випробування в режимі розтягування серії гумових еластомерів з різним ступенем зшивання. Як видно з графіка, динамічний модуль, виміряний в області плато гумоподібності зростає зі збільшенням ступеня зшивання. У той же час спостерігається зміщення температури склування в бік вищих значень температури

Для спрощення методу випробування та скорочення часу вимірювання можна також запрограмувати коротке динамічне випробування з часовою розгорткою при температурі, що лежить в межах плато гумоподібності, а виміряний при цьому модуль зберігання використати в рівнянні (2) або (4) для обчислення M_c . Зверніть увагу, що використання модуля, виміряного на плато гумоподібності, для розрахунку густини зшивання застосовується тільки для ненаповнених термореактивних полімерів.

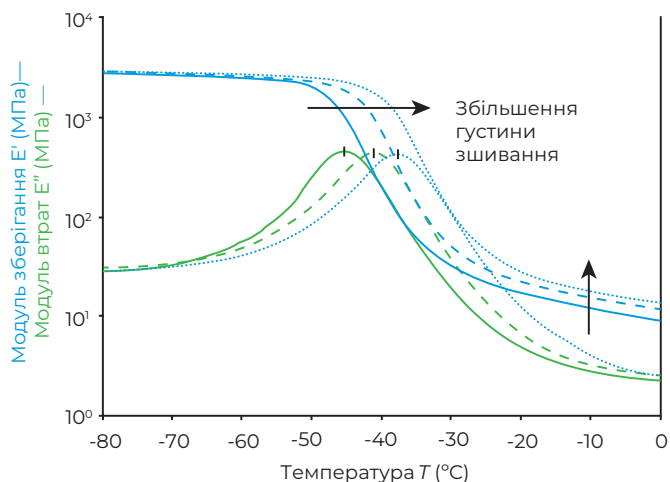


Рисунок 4. Результати DMA-випробувань зшитих еластомерів з різною густиною зшивання при лінійній зміні температури

Список літератури

- 1 C.W.Macosko, Rheology: Principles, Measurements, and Applications; Wiley-VCH, New York, New York (1994)
- 2 F. Abd-El Salam, M. H. Abd-El Salam, M. T. Mostafa, M. R. Nagy, M. I. Mohamed, Journal of Applied Polymer Science, 90, 1539–1544 (2003)
- 3 K.S. Santhosh Kumar et al. European Polymer Journal, 43 2504–2514, (2007)
- 4 I. M. Barszczewska-Rybarek, A. Korytkowska-Walach, M. Kurcok, G. Chladek, J. Kasperski, Acta of Bioengineering and Biomechanics. Vol.19, No 1, (2017)
- 5 L. E. Nielsen "Mechanical Properties of Polymers and Composites", page 169, 2nd edition, Marcel Dekker, 1994

Подяки

Ця стаття написана д-ром Тіанхонгом Террі Ченом, старшим науковим співробітником з підтримки застосувань в TA Instruments.

Визначення ступеня отвердіння композиту

Задача

Кінцеві властивості термореактивних композитних матеріалів, таких як гальмівні накладки, залежать від ступеня отвердіння, досягнутого під час обробки. Для моніторингу ступеня отвердіння термореактивних матеріалів можна використовувати різні методи термічного аналізу. Наприклад, диференціальна сканувальна калориметрія (DSC) дозволяє визначити ступінь отвердіння на основі кількості додаткового отвердіння (з відповідним виділенням тепла), яке відбувається при подальшому нагріванні. Ступінь отвердіння також можна визначити через температуру склування (T_g) матеріалу, виміряну за допомогою DSC або термомеханічного аналізу (ТМА). На жаль, ввикористання цих методів для вивчення армованих або високонаповнених композитів може зтикатися з труднощами.

Рішення

Динамічний механічний аналіз (DMA), який дозволяє вимірювати модуль (жорсткість) і демпфуючі властивості матеріалів, забезпечує більш чутливу альтернативу для визначення T_g композитів. Висока чутливість DMA ґрунтується на значних змінах модуля (кілька десятків) і демпфування, що відбуваються при T_g . На Рисунках 1-4 показано результати DMA для двох композитних гальмівних накладок. [Умови DMA: Вертикальні затискачі; розмір зразка 41 x 14 x 3,6 мм³ (нормальний); частота 1 Гц; амплітуда коливань 0,2 мм; швидкість нагрівання 3°C/хв від температури навколишнього середовища до 200°C]. Величина T_g для обох матеріалів легко визначається по положенню піків на профілях демпфування (модуля втрат). З цих результатів можна зробити кілька висновків:

1. Матеріал 1 має вищу T_g , ніж Матеріал 2 у стані "як отримано", а також вищий модуль при температурах нижчих та вищих T_g , ймовірно, через різні полімери матриці та/або різний склад й орієнтацію армування.
2. Повторне нагрівання Матеріалу 1 не підвищує T_g так сильно, як повторне нагрівання Матеріалу 2. Таким чином, Матеріал 1 первісно мав більш високий ступінь отвердіння.
3. Матеріал 2 має профіль демпфування з формою кривої бімодального розподілу, що вказує на присутність в його складі двох різних полімерів.
4. Повторне нагрівання Матеріалу 2 призводить до збільшення величини модуля при температурах нижчих та вищих T_g , тоді як високотемпературний пік на профілі демпфування зміщується в бік більших значень температури, вказуючи на те, що Матеріал 2 первісно мав низький ступінь отвердіння. Зсув низькотемпературного піку в бік менших значень температури при повторному нагріванні, може вказувати на певну термічну деградацію.

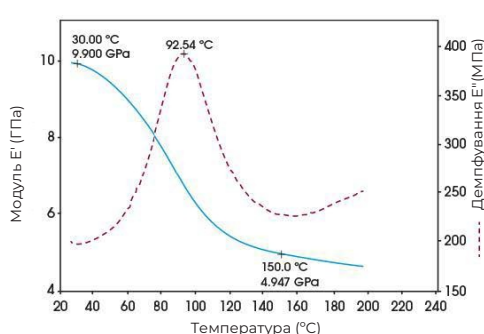


Рисунок 1. Композитний Матеріал 1 - Профілі, виміряні при першому нагріванні

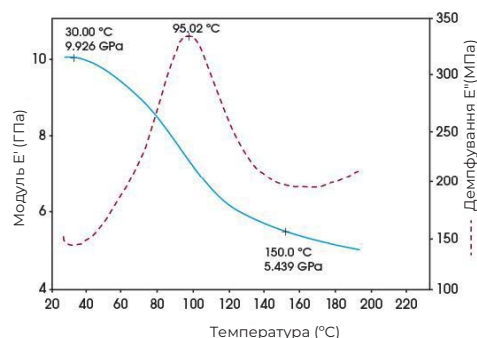


Рисунок 2. Композитний Матеріал 1 - Результати повторного нагрівання

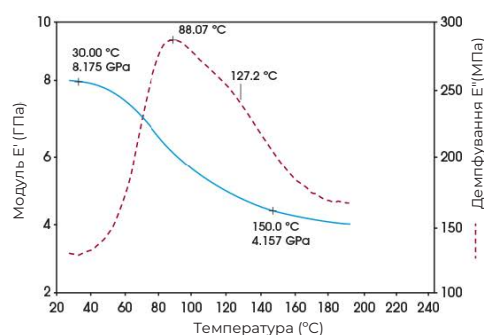


Рисунок 3. Композитний Матеріал 2 - Профілі, виміряні при першому нагріванні

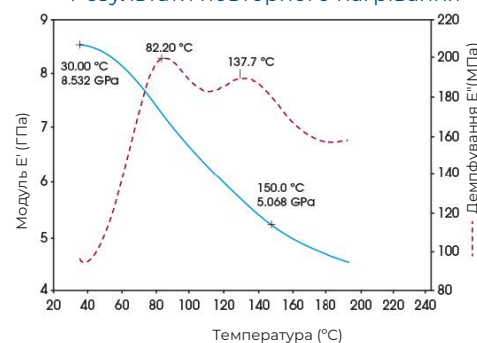


Рисунок 4. Композитний Матеріал 2 - Результати повторного нагрівання

Подяки

Ця стаття ґрунтується на дослідженнях Джона Формана з Лабораторії застосувань TA Instruments.

Втомна поведінка тканих склопластикових композитів при деформаціях згину при підвищених температурах

Анотація

У цьому дослідженні механічний аналізатор з навантажувальною рамою ElectroForce 3330 використовується для вивчення впливу робочої температури на властивості при згині та втомну довговічність двох марок тканих склопластикових композитів Garolite з використанням навантажувальної рами Electroforce 3330. Зразки досліджувались за чотириточковою схемою згину з подачею монотонного навантаження та синусоїдального втомного навантаження при двох робочих температурах. Виміряно та порівняно міцність на вигин, модуль пружності та втомну довговічність композитів. Результати демонструють температурні залежності механічних властивостей і втомної довговічності при згинальному навантаженні. Хоча втомна довговічність обох марок Garolite значно зменшилася при більш високій робочій температурі 100 °C, але втрата міцності для марки G11 є значно меншою, ніж для G10. Ці експериментальні методи та результати можуть бути корисними для кращого розуміння експлуатаційних характеристик матеріалів за різних робочих температур у різних сферах застосування.

Вступ

Ткані склопластикові композити широко застосовуються в елементах конструкцій оскільки вони мають вищі співвідношення коефіцієнту жорсткості до маси та границі міцності до маси порівняно з традиційними матеріалами, такими як метали, кераміка та пластмаси.[1] Garolite - це добре відомий високоефективний тканий склопластиковий композит, виготовлений зі скловолоконної тканини, зануреної в різні термореактивні смоли. Завдяки своїм електроізоляційним властивостям, стабільності розмірів, довговічності та вологостійкості він використовується в електроніці, медицині, аерокосмічній і морській галузях. G10 і G11 - це дві марки склоепоксидних ламінатів Garolite, які відрізняються надзвичайно високою міцністю та термічною стабільністю. Хоча G-11 має схожий склад з G-10, але для того, щоб вона зберігала конструкційну міцність при підвищених температурах, в смолу додають інші домішки.

Температура є одним з вирішальних факторів, які можуть впливати на експлуатаційні характеристики композитів. Попередні дослідження показали, що підвищення робочої температури знижує міцність армованого волокном композиту через розкладання смоли та ослаблення зв'язку між волокнами[2]. Тому зростає застосування Garolite, або взагалі композитів, при більш високих температурах потребує кращого розуміння їхньої термостійкості. Однак дотише в декількох роботах вивчався вплив температури на механічні властивості Garolite при втомному навантаженні. Повторювані або циклічні навантаження неминучі в багатьох сферах застосування, а оскільки композити накопичують при цьому пошкодження, такі як тріщини та деформації, то важливо ретельно оцінити, на скільки скорочується строк.[3] У цьому дослідженні розглядаються механічні властивості двох комерційно доступних композитів Garolite, G10 і G11, при двох різних температурах, а саме вивчається вплив температури на їхню втомну поведінку.

Деталі експерименту

Дві комерційно доступних прямокутних пластини, виготовлених з тканих склопластикових композитів G10 і G-11, з поперечним перерізом 25,4 мм X 3,2 мм (виробництва McMaster-Carr, Іллінойс, США) були випробувані для оцінки їх конструкційної стабільності при підвищених температурах. Характеристики матеріалу, надані постачальником, представлені в Таблиці

Параметр	G-10	G-11
Границя міцності на розрив (МПа)	240-345	289-404
Міцність на вигин (МПа)	310-413	384-528
Максимальна температура (° C)	130	170
* не було надано жодних даних щодо модуля пружності або втомної міцності		

Випробування зразків проводилось за схемою чотириточкового згину для випадків монотонного навантаження до руйнування та циклічного втомного навантаження до руйнування при кімнатній температурі (RT) та при 100 °C. Випробування проводили на механічному аналізаторі з навантажувальною рамою TA Instruments ElectroForce 3330, здатному розвивати зусилля до 3000 Н і оснащеному піччю з температурним діапазоном від -150 °C до 350 °C (Рис. 1).



Рисунок 1. Аналізатор з навантажувальною рамою ElectroForce 3330 з піччю та оснасткою для випробування на розтяг

Геометрія зразків та умови випробувань відповідали вимогам стандарту ASTM D6272-17[4]. Відстань між точками опори становила 54 мм, між точками навантаження - 18 мм (Рис. 2), тоді як випробувані зразки мали довжину 100 мм, щоб забезпечити достатню довжину вільоту для кожної точки опори. Грані зразків, до яких притискалися компоненти випробувальної оснастки, не піддавалися механічній обробці, щоб уникнути пошкодження приповерхневих волокон.

Випробування на монотонне навантаження проводилось при швидкості зміщення 0,03 мм/с, тоді як випробування на синусоїдальне циклічне втомне навантаження виконувалось з частотою зміщення 10 Гц. Всі експерименти на втому проводились в режимі контролю зусилля з використанням коефіцієнту асиметрії циклу напружень (R-ratio) 0,1. Для високотемпературних випробувань під нагрівали від кімнатної температури до 100 °C, витримували протягом 30 хвилин перед навантаженням і підтримували цю температуру протягом усього випробування. Результати монотонних випробувань були використані для встановлення максимальних рівнів напружень для випробувань на втому. Максимальне напруження, застосоване у випробуваннях на втому, становило від 25% до 95% від міцності на вигин.

Випробування на чотириточковий згин забезпечує більший розмір області максимальної концентрації напружень, що допомагає зменшити варіацію результатів, яка може виникати через локальну неоднорідності розподілу матеріалів в складі композиту. Максимальне напруження та деформація між точками навантаження (для випадку, коли відстань між ними дорівнює одній третині від відстані між точками опори) розраховуються за рівняннями 1 і 2 відповідно. [4]

$$S = PL / bd^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = 4.7Dd / L^2 \quad (2)$$

де S - напруження в зовнішньому волокні області між точками навантаження, P - навантаження в даній точці на кривій залежності прогину від навантаження, L - відстань між точками опори, b - ширина пластинки, d - товщина пластинки, ϵ - максимальна деформація в зовнішніх волокнах, D - максимальний прогин центру пластинки. Міцність на вигин визначається як максимальне напруження до руйнування матеріалу, а модуль пружності - як відношення напруження до деформації в області пружних деформацій.

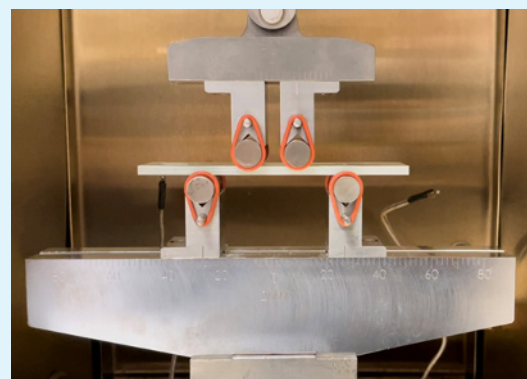


Рисунок 2. Випробування на чотириточковий згин прямокутного композитного зразка Garolite в печі ElectroForce 3330.

Результати та обговорення

Результати випробувань на чотириточковий згин з монотонним навантаженням показані на Рисунку 3. Типові діаграми деформування для композитів G10 і G11 при двох температурах RT та 100 °C представлені на Рисунку 3а. Для кожної умови було проведено три повторні випробування. Всі повторні випробування дали співпадаючі діаграми деформування, отримані результати показали узгоджену поведінку руйнування між зразками. Напруження наростає лінійно, поки не досягне максимального значення, і падає після руйнування

При кімнатній температурі композити G11 демонструє вищу міцність на вигин $487,1 \pm 9,9$ МПа порівняно з G10, для якого ця величина становить $409,0 \pm 2,4$ МПа (рис. 3b). Хоча обидва композити випробовуються в межах робочого температурного діапазону, але при вищому значенні температури вимірювання, 100 °C, спостерігається значне падіння міцності на вигин. Проте G11 демонструє значно кращі показники, зберігаючи ~80% своєї конструкційної міцності, тоді як G10 зберігає лише 68% своєї міцності. Варто зазначити, що модуль пружності обох композитів зменшується при вищій робочій температурі, незважаючи на те, що вона є нижчою за вказану постачальником максимальну робочу температуру. Хоча експериментальні результати, отримані при кімнатній температурі, узгоджуються з властивостями матеріалу, зазначеними постачальником, Таблиця 1, але спостерігається деградація конструкційної міцності обох композитів при 100 °C, що значно нижче вказаної максимальної робочої температури.

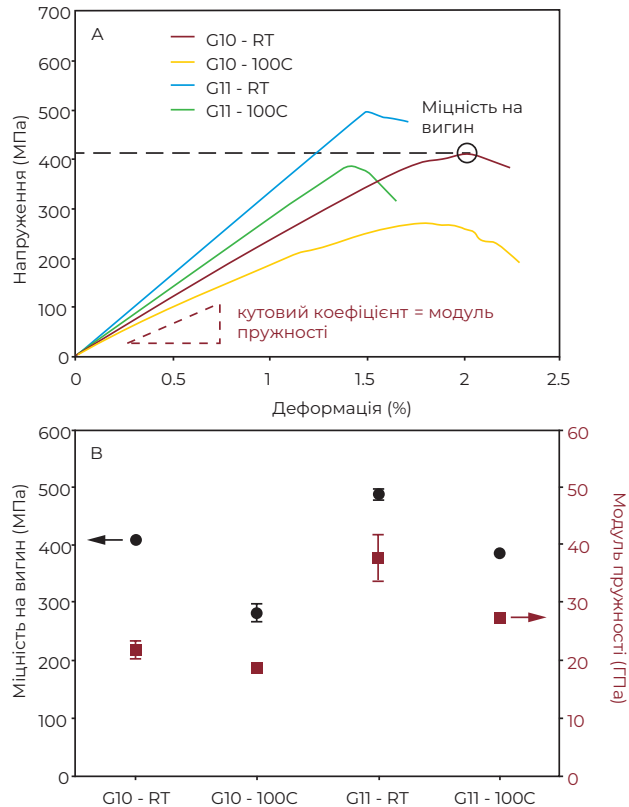


Рисунок 3. Результати чотириточкових випробувань на згин з монотонним навантаженням прямокутних пластинок Garolite G10 і G11: (A) типові діаграми деформування; (B) середня міцність на вигин і модуль пружності

Випробування на втому за чотириточковою схемою згину проводили з безперервним навантаженням для накопичення пошкоджень в системі композитного матеріалу та оцінки кількості циклів, необхідної для руйнування зразка при різних рівнях напружень. Початкові експерименти на втому проводились при напруженні, яке становило 95% від середнього значення міцності на вигин (границі пропорційності на діаграмі деформування), визначеному в монотонних випробуваннях. Для того, щоб досягнути руйнування зразків при циклічних навантаженнях використовувалися достатньо високі рівні втомних напружень, що становили від 25% до 95% від напруження границі пропорційності. Коефіцієнт асиметрії циклу 0,1 означає, що верхня поверхня зразка, яка контактувала з точками навантаження, зазнавала стисних напружень, тоді як інша поверхня, яка контактувала з опорними точками, зазнавала розтяжних напружень. Втомна довговічність кожного зразка характеризується кількістю циклів до остаточного руйнування.

На Рисунок 4 показано втомну довговічність (кількість циклів до руйнування) як функцію максимального втомного напруження (крива S-N) для кожного композиту при двох температурах. Криві S-N дозволяють порівняти втомні характеристики кожного композиту при різних температурах. Результати показують, що кількість циклів до руйнування зменшується зі зростанням напруження у всіх випадках; однак при кімнатній температурі G11 має значно кращі показники втомної довговічності порівняно з G10. Крім того, для G11 тривала експлуатація за температури 100 °C значно слабше впливає на втомну довговічність. Наприклад, для напруження 200 МПа втомна довговічність G10 при температурі 100 °C скорочується на 91% відносно значення, виміряного при кімнатній температурі, тоді як для G11 скорочення становить лише 46%. Після менш ніж 2 млн. циклів всі зразки були зруйновані, навіть коли рівні напруження становили лише 25% від міцності на вигин, тому адекватна оцінка придатності матеріалу для застосувань, в яких реальна кількість циклів навантаження може перевищувати 2 млн., потребує більш тривалих експериментів з нижчими рівнями напружень.

Висновки

Для двох марок композитів Garolite (G10 та G11) були проведені випробування на чотириточковий згин з монотонним навантаженням до руйнування та циклічним втомним навантаженням до руйнування при двох різних температурах RT та 100 °C. G11 демонструє вищу міцність на вигин порівняно з G10 при кімнатній температурі та зберігає вищу міцність при 100 °C. Втомні руйнування відбуваються до 2 мільйонів циклів при рівнях напруження навіть 25% від монотонної міцності на вигин, а межі витривалості не спостерігається. Тому для того, щоб визначити границі витривалості для застосувань з більш ніж 2 млн. циклів, потрібні більш тривалі випробування. Втомна довговічність композитів знижується при підвищених температурах. G11 показав значно кращі результати у збереженні конструкційної міцності при вищій робочій температурі 100 °C. Результати випробувань на чотириточковий згин показують, що температура має значний вплив на міцність на вигин і втомну довговічність композитів Garolite. Результати показують, що специфікації постачальників, наведені в Таблиці 1, можуть бути не застосовні для всього зазначеного діапазону температур. Тому важливо випробовувати матеріали при різних робочих температурах, щоб краще зрозуміти їхні експлуатаційні характеристики.

Перспективи на майбутнє

Результати більш повного дослідження впливу температури на модуль пружності та в'язкопружні властивості, проведеного з використанням методів DMA (динамічного механічного аналізу), будуть опубліковані в окремій Примітці щодо застосування. DMA дає більше інформації про температуру склування та властивості матеріалу поблизу й за межами максимальних номінальних температур.

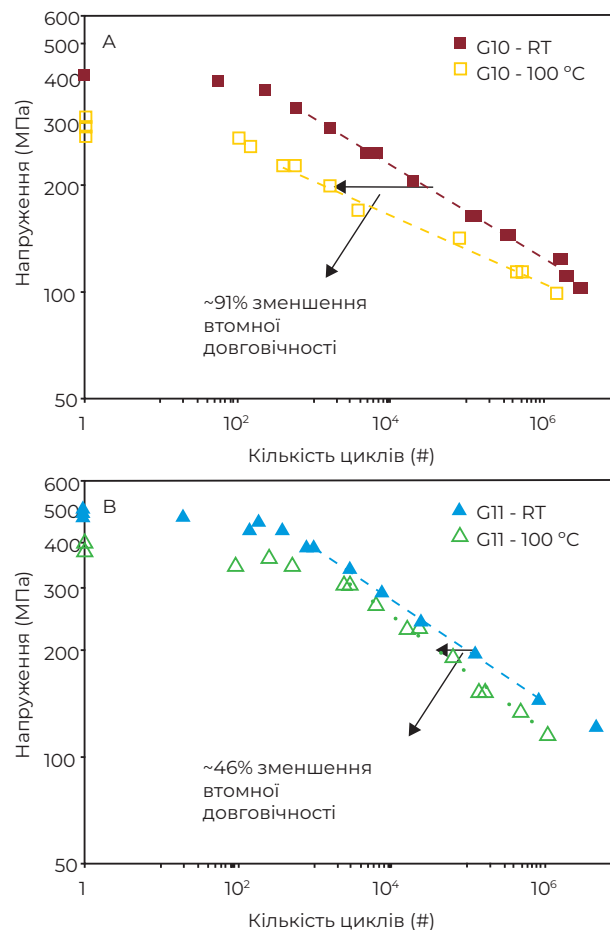


Рисунок 4. Криві S-N, виміряні при випробуваннях на втому за схемою чотириточкового згину при двох робочих температурах RT та 100 °C, для композитів Garolite: A) G10 B) G11.

Список літератури

- 1.Paradiso A, Mendoza I, Bellafato A, Lamberson L. Failure behavior of woven fiberglass composites under combined compressive and environmental loading. Journal of Composite Materials. 2020;54(4):519-533.doi:10.1177/0021998319878771
- 2.Zhou F, Zhang J, Song S, Yang D, Wang C. Effect of Temperature on Material Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Tendons: Experiments and Model Assessment. Materials (Basel). 2019;12(7):1025.Published 2019 Mar 28.doi:10.3390/ma12071025
- 3.Rasheduzzaman, Mohammad, and M. N. Cavalli. "Failure Mode Transition in Fiber Composite Fatigue." Fracture, Fatigue, Failure, and Damage Evolution, Volume 5. Springer, Cham, 2015.165-172.
- 4.ASTM D6272-17 (2017) Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending. ASTM International, West Conshohocken.

Подяки

Ця стаття написана д-ром Сохейлом Дар'яделом, науковцем з підтримки застосувань в TA Instruments.



LEM UKRAINE – це колектив кваліфікованих спеціалістів з багаторічним досвідом роботи в сфері постачання та обслуговування обладнання для термічного аналізу, молекулярної та атомної спектроскопії, систем для визначення характеристик частинок, порошоків та пористих матеріалів.



ТОВ «ЛЕМ УКРАЇНА»
вул. Рибальська, 2, оф. 302
Київ, 01011, Україна

тел.: +380 95 637 78 52
e-mail: info@lem-ukraine.com.ua
www.lem-ukraine.com.ua

Waters™



TA Instruments and Waters are trademarks of Waters Corporation.
All other trademarks are the property of their respective owners.

©2024 Waters Corporation. All rights reserved.
July 2024 ADV00001EN Rev. A

TA Instruments
159 Lukens Drive
New Castle, DE 19720 U.S.A.
T: 1 302 427 4000
F: 1 302 427 4041
www.tainstruments.com

Waters Corporation
34 Maple Street
Milford, MA 01757 U.S.A.
T: 1 508 478 2000
F: 1 508 872 1990
www.waters.com