УДК 539.3

Жук Я.О.¹, д. ф.-м. н., проф.

Y.A.Zhuk¹, Dr. Sci., Prof.

Теплова нестійкість нанокомпозитних елементів конструкцій при циклічному навантаженні

Thermal instability of nanocomposite structural elements under cyclic loading

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 64
e-mail: y.zhuk@i.ua

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 01033, Volodymyrska Street, 64
e-mail: y.zhuk@i.ua

Досліджується руйнування нанокомпозитного елемента конструкції внаслідок дисипативного розігріву при гармонічному навантаженні. Розроблено метод прогнозування втрати роботоздатності нанокомпозитних елементів конструкцій внаслідок теплової нестійкості, який ґрунтується на моделі моногармонічної апроксимації реакції матеріалу на циклічне навантаження, амплітудних співвідношеннях між основними польовими змінними та концепції температурно-і амплітудно залежних комплексних модулів. Вивчається циклічна витривалість та втрата стійкості по тепловому сценарію полімерного нанокомпозитного стержня під одночасною дією статичного і циклічного навантаження.

Ключові слова: нанокомпозит, тепла нестійкість, дисипативний розігрів

The failure of nanocomposite structural elements due to the self-heating under harmonic loading is investigated. The technique of the nanocomposite structural element life prediction is elaborated with accounting for the influence of dissipative heating and volume fraction of nanofibers on mechanical stability of polymeric nanocomposite rod subjected to both static and monoharmonic loading that are based on the concept of temperature and amplitude dependent complex moduli. In this regard, special modified homogenization procedure based on the Mori-Tanaka method is designed with taking into account the effects of interface on response of nanocomposite material to derive the complex moduli for the nanocomposite with either random or unidirectional orientation of nanofibers. Complex moduli approach is used to formulate the approximate (single frequency approximation) problem statement. The problem is solved numerically. Influence of carbon nanotube fiber volume fraction on the high cycle fatigue behavior for the nanocomposite rod with both randomly and unidirectionally oriented nanofibers is estimated. It is found that volume fraction of nanofibers affects significantly the temperature level and, thus, fatigue life of nanocomposite element. The approach presented in this paper can be useful to understanding of the cyclic behavior of viscoelastic structures and investigations of the fatigue with taking into account the vibro-heating effect due to the mechanical energy dissipation.

Key Words: nanocomposite, thermal instability, dissipative heating

Статтю представив акад. НАН України, д.ф.-м.н., проф. Перестюк М.О.

1. Introduction

Полімерні нанокомпозити знайшли своє застосування у багатьох високотехнологічних сферах, таких як авто- та авіабудування, машинобудування, будівництво тощо. Завдяки низькій теплопровідності, високим дисипативним характеристикам та значній залежності механічних властивостей пластмас від температури ефекти термомеханічної зв'язаності можуть бути значними особливо у випадках циклічного (зокрема моногармонічного) навантаження. При циклічному

навантаженні полімерні матеріали демонструють в'язкопружну поведінку, що призводить до дисипативних процесів в елементах конструкцій. Дисипація механічної енергії в тепло призводить до саморозігріву та підвищення температури, оскільки низькі значення коефіцієнта теплопровідності унеможливають ефективний відвід тепла від зони його локалізації у композитному елементі. Температура дисипативного розігріву може досягати достатньо високих рівнів, які, як наслідок, можуть викликати критичні теплові стани, зок-

© Я.О. Жук, 2019

рема, призводити до явища теплової нестійкості елемента конструкції.

У даній роботі розвивається підхід до дослідження впливу вібророзігріву на теплову стійкість полімерного нанокompозитного елемента, що ґрунтується на концепції комплексних модулів і в рамках якого враховуються залежності модулів накопичення і втрат від температури і амплітуди деформації [1]. Представлене дослідження присвячене впливу дисипативного розігріву на теплову стійкість полімерного нанокompозитного стержня з випадково або однонаправлено орієнтованими нановолокнами, що складаються з вуглецевих нанотрубок (CNT), за різних значень об'ємного вмісту волокон. Отримані в рамках розвинутого підходу результати дозволять визначити критичні значення параметрів навантаження, дослідити еволюцію температури вібророзігріву нанокompозитного елемента, та визначити залежність між рівнем навантаження та кількістю циклів до теплового руйнування конструкції.

2. Моделювання реакції нанокompозита при моногармонічному навантаженні

Модель для описання непружної поведінки двох композитних матеріалів на полімерній основі, армованих CNT волокнами, при довільному навантаженні розвинуто в [2]. Ці нанокompозити демонструють макроскопічні властивості трансверсально ізотропного матеріалу при однонаправленому армуванні CNT волокнами та властивості ізотропного матеріалу при випадковій орієнтації волокон. Для розвитку такої моделі досліджено реакцію складових і розроблено процедуру гомогенізації для отримання макроскопічних властивостей нанокompозитів [3]. Для полімерної матриці використано феноменологічну модель, що описує всі особливості реакції матеріалу в часі на довільних історіях навантаження (далі в тексті – повна модель), після чого за допомогою процедури еквівалентної лінеаризації отримано комплексні модулі полімерної матриці за умов кінематичного гармонічного навантаження. У даному дослідженні CNT волокна вважаються пружними трансверсально ізотропними з п'ятьма незалежними пружними константами. Ґрунтуючись на концепції перерозподілу навантаження між включенням та матрицею, а також використовуючи комплексний коефіцієнт Пуассона для матеріалу матриці, в статті [4] запропоновано моделювати присутність поверхні контакту фаз за допомогою стрибка переміщення. Зрештою, розробляється схема гомогенізації,

яка застосовується до отриманих комплексних модулів матриці, волокон та поверхні контакту з метою визначення загальних макроскопічних комплексних модулів композиту як однорідного матеріалу.

3. Постановка задачі та методика її розв'язання

Розглядається проблема вібророзігріву нанокompозитного стержня з круговим поперечним перерізом. Довжина стержня та радіус поперечного перерізу позначені L і R , відповідно. Нанокompозитний стержень піддається як статичному стискальному, так і гармонічному навантаженню з малою амплітудою, $P(t) = P_0 + P_1 \cos \omega t$, які прикладаються на вільному кінці. Другий кінець стержня є жорстко закріпленим. Передбачається, що частота збудження, ω , є достатньо малою, щоб гарантувати відсутність будь-яких параметричних, суб- або супергармонічних резонансів. Для навантажувальних сил та амплітуд має місце нерівність $P_1 \ll P_0 < P_{cr}$, де P_{cr} – Ейлерове критичне навантаження. За таких припущень обґрунтованим є застосування квазістатичної теорії в'язкопружності.

Співвідношення між напруженнями і деформаціями у в'язкопластичному стержні має добре відомий вигляд:

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= \sigma_0 + \sigma_1 \cos \omega t, \\ \varepsilon(t) &= \sigma_0 J^\infty + \sigma_1 \operatorname{Re}[\tilde{J} e^{i\omega t}],\end{aligned}\quad (1)$$

де J^∞ – рівноважна податливість, а $\tilde{J} = J' - iJ''$ – комплексна податливість; σ_0 and σ_1 – величина сталого стискання та амплітуда гармонічного навантаження, відповідно. Усереднена за період коливань швидкість дисипації енергії, $\langle D' \rangle$, (див. (2)) використовується в якості джерела тепла в перехідному процесі в рівнянні (2), до якого зводиться одновимірне рівняння теплопровідності, що описує еволюцію температури у в'язкопластичному стержні, за прийнятого припущення однорідності розподілу температури по довжині (в даній задачі всі поперечні перерізи стержня за таких умов мають однакову температуру)

$$\begin{aligned}\frac{d\theta^*}{dt} &= -\frac{\alpha_l S}{c_v V} \theta^* + \frac{\alpha_l S}{c_v V} \frac{\langle D' \rangle}{c_v \theta_0}, \\ \langle D' \rangle &= \frac{\omega}{2\pi} \int_t^{t+\frac{2\pi}{\omega}} \sigma(\xi) \dot{\varepsilon}(\xi) d\xi = \frac{\omega}{2} J'' \sigma_1^2,\end{aligned}\quad (2)$$

де $\theta^* = \theta / \theta_0$ – нормалізована температура. Коефіцієнт α_l – питома теплоємність при сталому об'ємі та коефіцієнт тепловіддачі з

поверхні стержня, відповідно; S , V і θ_0 – площа бічної поверхні, об'єм стержня і температура навколишнього середовища, відповідно. Рівняння (2) доповнюється відповідною початковою умовою. Для розрахунку модуля втрат для коефіцієнта податливості, J'' , при заданому значенні інтенсивності деформації використовується наближений вираз $J'' = J_0'' \theta^{*\beta}$, де J_0'' – початкове значення відповідного модуля втрат при гармонічному навантаженні, β – константа матеріалу. Рівняння (2) можна переписати у вигляді

$$\frac{d\theta^*}{d\tau} = -\theta^* + 1 + \mu\theta^*, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\omega}{2c_V\theta_0} J_0'' \sigma_1^2, \quad \lambda = \frac{\alpha_t S}{c_V V},$$

де μ та λ є параметром навантаження і часовою константою відповідно.

Дослідимо вплив вібророзігріву на втомну поведінку в'язкопружного стержня. Для знаходження критичної сили, P_{cr} , може бути використаний Ейлерів підхід. Беручи до уваги однорідність поля температури і умову $P_1 \ll P_0$, диференціальне рівняння осі стержня та вираз для Ейлерового критичного навантаження можна записати у вигляді:

$$\frac{d^4 w}{dz^4} + \xi_0^2 \frac{d^2 w}{dz^2} = 0, \quad \xi_0 = \left(\frac{P_0 J''}{I} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 I}{J'' (KL)} = \frac{\chi}{J''},$$

де K і L – ефективний коефіцієнт довжини стержня та його довжина, відповідно; w і χ – прогин і стала, яка залежить від форми стержня та умов його закріплення.

Методика визначення комплексних модулів нанокompозиту на основі полімерної матриці, яка включає в себе моделювання повної поведінки складових, процедури гомогенізації на основі моделі Морі–Танака, модифікованої для врахування впливу міжфазного контакту, та еквівалентної лінеаризації з використанням циклічної діаграми детально описані в [5].

4. Числові результати

Теплова втомна поведінка досліджувалась для полімерного нанокompозитного матеріалу із різним об'ємним вмістом та орієнтацією CNT волокон. Довжина та радіус поперечного перерізу стержня вибирались рівними 0,5 і 0,03 м, відповідно. Вважається, що тепловий

початковий стан для рівняння теплопровідності задається у формі $\theta(0) = \theta_0 = 25^\circ\text{C}$. Фізичні параметри епоксидної матриці (PR-520) та CNT волокон вибрані наступними [5]: $c_V^f = 0,629 \cdot 10^6$ Дж/м³·°К, $c_V^m = 1,513 \cdot 10^6$ Дж/м³·°К, $\lambda^f = 2000$ Дж/м·°К, $\lambda^m = 0,47$ Дж/м·°К, $\alpha_0^m = 45 \cdot 10^{-6}$ 1/°К, $\alpha_0^f = 3,10^{-6}$ 1/°К, $\rho^f = 1680$ кг/м³, $\rho^m = 1214$ кг/м³ та $a_t = 20$ Вт/м²·°К.

Нанокompозитний стержень піддається як статичному стисканню, так і низькоамплітудному гармонічному навантаженню, що прикладається до вільного кінця. Частота гармонічного збудження вважається рівною 1 Гц, що набагато менше перших поздовжніх та згинальних резонансів.

На Рис. 1 показано вплив об'ємної частки CNT волокон на втомні $\sigma_1 \sim N$ криві для ненаповнених полімерних та нанокompозитних стержнів, що зміцнені довільно орієнтованими CNT волокнами при температурі 25°С.

Вздовж вертикальної осі відкладена амплітуда прикладеного циклічного навантаження, а вздовж горизонтальної осі – кількість циклів до руйнування. Результати показують, що втомна $\sigma_1 \sim N$ крива для нанокompозитних стержнів лежить значно вище, ніж у випадку чистого полімерного стержня. Отже, для нанокompозитних

Рис. 1. Криві теплового втомного руйнування полімерного нанокompозитного стержня, зміцненого довільно орієнтованими волокнами.

стержнів, що деформуються з частотою 1 Гц, теплове втомне руйнування спостерігається при вищих рівнях навантаження, ніж для чистого ненаповненого полімерного стержня.

На Рис. 2 аналогічні результати представлені для полімерних нанокompозитних стержнів, зміцнених однаправленими CNT волокнами.

Тут $\sigma_1 \sim N$ крива зсувається вгору зі збільшенням об'ємної частки CNT волокон. Кожна крива стає майже горизонтальною при високій кількості циклів. Це означає, що коли амплітуда напруження має значення нижче граничної величини, яка відповідає межі втоми, то число циклів до руйнування стане нескінченно великим, і в такому випадку втоми руйнування не відбувається.

Рис. 2. Криві теплового втоми руйнування полімерного нанокompозитного стержня, зміцненого однонаправленими волокнами.

5. Висновки

В даній роботі досліджується руйнування нанокompозитного елемента конструкції внаслідок дисипативного розігріву при гармонічному навантаженні. Розроблено метод прогнозування втрати роботоздатності нанокompозитних елементів конструкцій внаслідок теплової нестійкості. Вивчено циклічну витривалість за тепловим критерієм для полімерного нанокompозитного стержня під одночасною дією статичного і циклічного навантаження. Встановлено, що для армованих нанокompозитних стержнів теплове втоми руйнування спостерігається при вищих рівнях навантаження, ніж для чистого ненаповненого полімерного стержня. Збільшення об'ємної частки CNT волокон дозволяє збільшити ресурс роботи стержня. Спостерігається плавний перехід від зони малоциклової до зони багатоциклової втоми для всіх досліджених значень об'ємного вмісту наповнювача.

Список використаних джерел

1. Karnaukhov, V.G. Thermomechanics of coupled field in passive and pizoactive inelastic bodies under monoharmonic deformation / Journal of Thermal Stresses –2005. – № 28. –P. 783–815.
2. Hashemi, M. A procedure for complex moduli determination for polycarbonate plastic under harmonic loading / M. Hashemi, Y. A. Zhuk // Bulletin of KNU. Physical and Math. Sci. – 2015. – № 4. P. 67–73.
3. Hashemi, M. Influence of frequency and amplitude of harmonic loading on complex moduli for polymer materials / M. Hashemi and Y. A. Zhuk // Bulletin of KNU. – 2016. –№ 35. P. 53–57.
4. Qu, J. The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials / Mechanics of Materials. – 1993. – Vol. 14, № 4. – H. 269–281.
5. Hashemi, M. Prediction of Thermal Instability–Initiated Performance Losses by Nanocomposite Structure Elements Under Cyclic Loading / M. Hashemi, Y. Zhuk// Strength of Materials. – 2017. – Vol. 49, No 5. – P. 635–651.

References

1. KARNAUKHOV, V.G. (2005) Thermomechanics of coupled field in passive and pizoactive inelastic bodies under monoharmonic deformation. *Journal of Thermal Stresses*. Vol.28. p. 783–815.
2. HASHEMI, M., & ZHUK Y. A. (2015) A procedure for complex moduli determination for polycarbonate plastic under harmonic loading. *Bulletin of KNU. Physical and Math. Sci.* № 4. p. 67–73.
3. HASHEMI, M., & ZHUK Y. A. (2016) Influence of frequency and amplitude of harmonic loading on complex moduli for polymer materials. *Bulletin of KNU*. № 35. p. 53–57.
4. QU, J. (1993) The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*. –Vol. 14, № 4. – p. 269–281.
5. HASHEMI, M., & ZHUK Y. A. (2017). Prediction of thermal instability–initiated performance losses by nanocomposite structure elements under cyclic loading. *Strength of Materials*. – Vol. 49, No 5. – p. 635–651.

Надійшла до редколегії 14.06.19