УДК 629.7.02:539.67

Мозговий О.В., канд. техн. наук, доцент
Іщенко Р.М., канд. фіз.-мат. наук, доцент
Національний транспортний університет, м. Київ, mavimfto@gmail.com
Семеренко Ю.О., канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник
Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Вєркіна НАН України

РОЗСІЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИТАМИ У ЗВУКОВОМУ ДІАПАЗОНІ

У композиційних матеріалах з полімерною матрицею (ПКМ) елементами для армування, як правило, використовують скляні, базальтові, органічні та вуглецеві волокна. Це надає ПКМ високу питому міцність, підвищені експлуатаційні та технологічні властивості за низьких енерго- і трудовитрат виготовлення деталей. Лопаті сучасних вітродвигунів, що працюють під впливом великих статичних і динамічних навантажень, виготовляють зі скло- і вуглепластиків. Для зниження вартості виготовлення лопатей вітрових турбін є використання гібридних ПКМ із застосуванням дешевших волокон для армування при збереженні високих пружних і міцністних характеристик композиту. Вуглепластики мають вищу міцність і модуль пружності, ніж склопластик, але їхня вартість на порядок вища. Використання базальтових волокон замість вуглецевих (2-7 $/кг порівняно з 25-35 $/кг) дозволяє зберегти високі експлуатаційні характеристики. Важливою характеристикою лопатей вітряних турбін є демпфувальні властивості, проте вони вивчені недостатньо.

У роботі в ділянці звукових частот досліджено розсіювання механічної енергії ПКМ на основі вуглецевих волокон, які використовуються при виготовленні оболонки і лонжерона лопаті вітряної турбіни. Зразки ПКМ для випробувань отримували вакуумно-автоклавним пресуванням препрегів. Як зв'язувальну речовину використано епоксидну смолу ЕДТ-69Н з температурою затвердіння 398 К. В одному з варіантів в оболонці лопаті до сполучної речовини для збільшення поперечної міцності та модуля пружності були введені дрібнодисперсні добавки з частинок муліту ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

Для дослідження розсіювання механічної енергії зразки розміром 3x4x85 мм^3 вирізали вздовж осі лопаті з пластин ПКМ. У зразках, які використовуються для виготовлення лонжерона, вуглецеві і базальтові волокна розміщені паралельні осі зразка. Для оболонки вуглецеві і базальтові волокна укладаються під кутом 20°, скляні волокна розміщені під кутом 70° до осі зразка.

Амплітудні залежності внутрішнього тертя (АЗВТ) вимірювали на зворотному крутильному маятнику. Частота коливань становила 1 Гц, амплітуда деформації - $2x10^{-5}$ до $5x10^{-3}$.

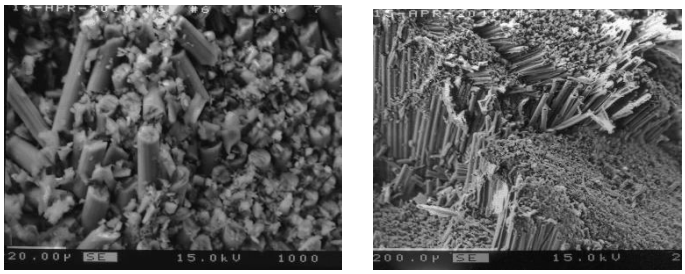
На амплітудних залежностях внутрішнього тертя не виявлено гістерезису перебігу кривих під час збільшення і зменшення амплітуди деформації. Для ПКМ, з яких виготовляють оболонку лопаті вітряних турбін, спочатку спостерігається амплітудно-незалежна область при армуванні тільки вуглецевими і скляними волокнами. Коли були введенні базальтові волокна, значення першої критичної зменшилося, а величина фону внутрішнього тертя збільшилася.

Введення в матрицю композиту високомодульних дрібнодисперсних добавок із частинок муліту призвело до зменшення фону внутрішнього тертя, що свідчить про більший вплив матриці полімерного композиту на розсіювання механічної енергії. Частинки муліту зміцнили полімер, зменшуючи при цьому величину розсіювання механічної енергії, що й підтверджується експериментально.

Характерним для зразків лонжерона є відсутність амплітудно-незалежної області на кривих АЗВТ. При збільшенні амплітуди деформації розсіювання механічної енергії збільшується. Потім величина внутрішнього тертя мало залежить від амплітуди.

Механічні затухання звукової частоти вивчали на спеціально виготовленій установці, що дає змогу записувати розгортку затухаючих коливань у комп'ютер. Зразки були консольно затиснуті, а вільний кінець після збудження коливань здійснював затухаючі коливання. Дані записувалися в комп'ютер. Було визначено вплив структури, напряму укладання армуючих волокон і їхнього складу на власну частоту механічних коливань, швидкість спаду амплітуди і логарифмічний декремент затухаючих коливань, значення основних частот і частот гармонік досліджуваних ПКМ.

Мікроструктуру поверхні зламів ПКМ вивчали за допомогою растрового електронного мікроскопа CAMEBAX-SX-50. Додавання базальтових волокон замість вуглецевих призводить до зміщення низькомодульних базальтових волокон по межах зерен розділу вуглець-базальт, що підвищує розсіювання механічної енергії (рис. 1).



а б

Рис. 1 – Мікроструктура поверхні зламів при розтягуванні односпрямованих ПКМ на основі вуглецевих волокон (а); на основі вуглецевих і 20% базальтових волокон (б).

Наявність різних елементів для армування композиту сприяє більш рівномірному розподілу напружень. Розсіювання механічної енергії не тільки залежить від виду волокон для армування, а також і від їхнього розташування.

Основна частота ПКМ для оболонки знаходиться близько 300 Гц, а для лонжерона - 400 Гц. Спостерігаються для лонжерона додаткові гармоніки за великих частот: 780 Гц, 2430 Гц, 6150 Гц, 6610 Гц. У діапазоні до 500 Гц для всіх композитів спостерігаються основні частоти від 250 Гц до 350 Гц. Для вищих частот за наявності тільки вуглецевих волокон у кожній наступній тисячі герц притаманні резонансні частоти. Наявність скляних і вуглецевих волокон прибирає частоти вище 5000 Гц, а базальтові волокна з вуглецевими зменшують амплітуду середніх частот у діапазоні до 3000 Гц. Введення в композит усіх трьох армуючих елементів ще більше зменшує кількість резонансних частот, як у середніх так і вищих діапазонах частот до 9000 Гц. При цьому відбувається перерозподіл напружень у матеріалі та затухання коливань.

Встановлено, що в матеріалі оболонки загасання відбуваються швидше, ніж в односпрямованих ПКМ для лонжерона. Це можна пояснити структурою зразка. Наявність армуючих волокон під різними кутами до поздовжньої осі на початку загасання до 0,1 секунди швидко зменшується в півтора рази, а потім швидкість його зменшення аналогічна до попереднього композиту.

Таким чином, використання базальтових і скляних волокон не зменшує міцністних властивостей полімерних композитів з вуглецевими волокнами, а дає змогу здешевити вироби з ПКМ і поліпшити експлуатаційні властивості лопатей вітряних генераторів.

Використання коливань в інфра- і звуковому діапазоні частот при дослідженнях розсіювання механічної енергії полімерними композитами дозволяє отримати експериментальні дані для наукового обґрунтування технологій виготовлення лопатей вітряних генераторів.