

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

МОВАГГАР АЛІ



УДК 539.3

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВТОМИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ
КОНТИНУАЛЬНОЇ МЕХАНІКИ ПОШКОДЖУВАНOSTI

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Львов Геннадій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри динаміки та міцності машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, провідний науковий співробітник
Бородій Михайло Васильович,
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка
НАН України, м. Київ,
провідний науковий співробітник відділу міцності
матеріалів і елементів конструкцій при
криогенних температурах

доктор технічних наук, професор
Шульженко Микола Григорович,
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
НАН України, м. Харків,
завідувач відділу вібраційних та термоміцнісних
досліджень

Захист відбудеться «27» лютого 2013 р. о 16³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «___» січня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.050.10



В. Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних задач, пов'язаних з розвитком сучасного машинобудування, є задача забезпечення втомної міцності та довговічності конструкцій з композиційних матеріалів. Граничні стани машин і споруд при циклічних навантаженнях стають результатом поступового накопичення втомних пошкоджень в процесі експлуатації, що призводить до зародження і розвитку макроскопічних тріщин, втрати працездатності та руйнування. Внаслідок складності та різноманітності механізмів руйнування й накопичення втомних пошкоджень в композитах, важко чекати появу універсальної теорії, придатної для різних композитів при довільних програмах циклічного навантаження.

Аналіз існуючих моделей, які описують процеси втоми композиційних матеріалів показав, що методи континуальної механіки пошкоджуваності потребують подальшого удосконалення. Деякі аспекти проблеми втоми цих матеріалів виникли відносно недавно й знаходяться ще на стадії розробки. До таких аспектів відноситься опис анізотропного стану пошкоджуваності з позиції термодинаміки необоротних процесів в умовах складного режиму навантаження. Крім того, існує недостатньо розробок, направлених на побудову моделей, орієнтованих на практичне застосування. Це відноситься як до розробки методики ідентифікації параметрів моделей континуальної пошкоджуваності, так і до застосування цих моделей в розрахунках реальних елементів конструкції з використанням сучасних програмних комплексів.

Таким чином, виникає актуальне наукове та практичне завдання, пов'язане з розробкою часткових теорій втомної міцності композитів, придатних для певних класів композиційних матеріалів з мінімальним набором необхідних експериментів для верифікації визначальних співвідношень. У цьому контексті перспективним є використання підходів, заснованих на сучасній механіці континуальної пошкоджуваності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі динаміки та міцності машин НТУ «ХП» згідно плану фундаментальних і прикладних науково-дослідних робіт МОН України: «Розробка математичних моделей та методів розрахунку нелінійного деформування і пошкоджуваності елементів конструкцій при інтенсивних навантаженнях» (ДР № 0106U001473), «Розробка методів дослідження нелінійного деформування і пошкоджуваності елементів конструкцій із однорідних та композиційних матеріалів» (ДР № 0109U002382), де здобувач був виконавцем окремих завдань.

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є розробка енергетичної моделі накопичення втомних анізотропних пошкоджень для розрахунку втомної міцності та кількісної оцінки накопичених пошкоджень в композиційних матеріалах, а також ідентифікація параметрів цієї моделі на основі результатів експериментів на втомну міцність зразків зі склопластика.

Досягнення поставленої мети здійснювалося шляхом розв'язання наступних задач:

- аналіз стану проблеми втомної міцності композиційних матеріалів в науково-технічних джерелах й формулювання задач дослідження;
- побудова теоретичної моделі накопичення втомних анізотропних пошкоджень в композиційних матеріалах;
- експериментальне визначення модулів пружності склопластика й експериментальне дослідження втомної міцності трьох партій зразків;
- розробка і обґрунтування методики ідентифікації параметрів теоретичної моделі на базі отриманих експериментальних даних;
- реалізація запропонованої моделі шляхом розв'язання прикладних задач визначення втомної міцності відповідальних елементів конструкцій, виготовлених із композиційних матеріалів – лопаті вітроенергетичної установки, торсіона несучого гвинта конвертоплана й ділянки П-образного компенсатора магістрального трубопроводу із захисним бандажем.

Об'єкт досліджень – процес накопичення втомних пошкоджень в скловолоконному композиті.

Предмет досліджень – методи та моделі для аналізу втомної міцності й моделювання накопичених втомних пошкоджень в конструкційних композиційних матеріалах.

Методи дослідження. Теоретичне моделювання процесу накопичення пошкодження проводилося на основі фундаментальних уявлень теорії пружності, класичної теорії композиційних матеріалів і континуальної механіки пошкоджуваності. У роботі для визначення модулів пружності динамічним методом трьох партій зразків використовувався вібростенд серії ВЭДС-10А. Втомні випробування проводилися на спеціальній установці типу ДП-5/3, яка призначена для визначення втомного опору вигину листових зразків. При обробці даних використовувався регресійний аналіз і стандартні пакети обчислювальних програм.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

- побудована теоретична модель розвитку втомних анізотропних пошкоджень в композиційних матеріалах на основі континуальної механіки пошкоджуваності;
- запропонований варіант використання теоретичної моделі у випадку ізотропної пошкоджуваності;
- для випадку плоского напруженого стану розвинена двовимірна модель і побудовані визначальні співвідношення з урахуванням впливу орієнтації головних напрямів тензора напруження відносно площини пружної симетрії матеріалу;
- запропонована методика ідентифікації параметрів, які входять в теоретичну модель пошкоджуваності.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- розроблений і реалізований метод розв'язання важливої для машинобудівної галузі практичної задачі визначення втомної міцності виробів із композиційних матеріалів;
- отримані експериментальні закономірності зміни параметрів анізотроп-

ній пошкодженості склопластика марки СТЭФ-1. Отримані залежності можуть бути використані для аналізу стану інженерних об'єктів;

– розв'язаний ряд важливих науково-технічних задач з визначення втомної міцності елементів конструкцій: лопаті вітроенергетичної установки V-15, торсіона несучого гвинта конвертоплана V-22 Osprey й ділянки П-образного компенсатора магістрального трубопроводу із захисним бандажем. Цінність розв'язаних задач полягає в можливості застосування розробленого підходу в науково-дослідних інститутах і конструкторських бюро при проектуванні конструкцій із композиційних матеріалів.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи використані в ході виконання європейського гранту «Innovative nondestructive testing and advanced composite repair of pipelines with volumetric surface defects» № PIRSES-GA-2012-318874 в рамках 7-ої рамочної програми європейського союзу в НТУ«ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення та основні результати досліджень, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них: розробка математичних моделей, алгоритмів і програмних засобів, планування й участь в проведенні експериментів, аналіз і узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Початкова постановка завдань дисертаційної роботи й обговорення результатів здійснені спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати й положення роботи докладалися та обговорювалися на: XVIII, XIX, XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2010, 2011, 2012 рр.); Міжнародній конференції «International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2010)» (м. Куала-Лумпур, Малайзія); Міжнародній конференції «International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics (X-MECH 2012)» (м. Тегеран, Іран).

Публікації. Основні наукові положення та результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових працях, серед яких: 6 – в наукових фахових виданнях, 5 – в працях міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 139 сторінок, 50 рисунків по тексту, 6 рисунка на 3 окремих сторінках, 10 таблиць по тексту, 127 найменувань використаних джерел на 13 сторінках, 1 додаток на 2 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження роботи, охарактеризовано новизну і практичну значимість наукових результатів, представлено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, наведено інформацію про апробацію роботи та публікації основних результатів.

Перший розділ присвячений аналізу досліджень особливостей деформа-

ції та руйнування композиційних матеріалів при циклічному навантаженні. Приведені роботи, автори яких використовували методи й підходи математичного моделювання процесів втомного руйнування композитів різних типів. На основі проведеного аналізу моделі можна розділити на три групи: 1) хоча втомна поведінка армованих волокном композиційних матеріалів суттєво відрізняється від поведінки металів, багато моделей в останнє десятиліття були розроблені на основі відомих S-N кривих або діаграми типу Гудмана. Такі моделі складають перший клас так званих «моделей втомної міцності». Ці моделі потребують великих експериментальних досліджень і не беруть до уваги реальні механізми пошкодження, такі як матричні руйнування й розрив волокон; 2) феноменологічні моделі для багатоциклової втоми. Ці моделі пропонують еволюційний закон, який описує поступову деградацію міцності або жорсткості матеріалу, виходячи з макроскопічних властивостей; 3) моделі на основі концепцій континуальної механіки пошкоджуваності, в яких пошкодженість кількісно описується деякими внутрішніми параметрами матеріалу.

Розвиток пошкодженості визначається еволюційними кінетичними рівняннями, які віддзеркалюють незворотний характер пошкодженості. Головним результатом всіх втомних моделей є прогноз втомної довговічності, причому кожна модель використовує свій власний критерій для визначення умови руйнування і, як наслідок, втомної довговічності композиційного матеріалу.

У другому розділі розглянуті загальні уявлення про кінетику накопичення пошкоджень, модельні представлення пошкодженості, її міра. Також розглянуті фізико-механічні уявлення ізотропної та анізотропної пошкоджуваності в твердих тілах.

Розроблена математична модель накопичення анізотропної пошкодженості на основі гіпотези про те, що швидкість накопичення втомних анізотропних пошкоджень в композиті залежить від максимальної енергії за цикл пружної деформації W^e , параметра циклу R , поточного рівня пошкодження D_{ij} та амплітудного напруження σ_{ij} . Для обчислення пошкоджуваності вводяться визначальні рівняння у вигляді кінетичного рівняння еволюційного типу

$$\frac{dD_{ij}}{dN} = f(W^e, R, D_{ij}, \sigma_{ij}) \quad (1)$$

Як міра анізотропної пошкодженості використаний симетричний тензор другого рангу. Передбачається, що швидкість накопичення втомних анізотропних пошкоджень описується степеневою функцією енергії пружної деформації композиту типу

$$\frac{dD_{ij}}{dN} = k(R) \cdot (W^e)^n \cdot M_{ijkl} \cdot \tilde{\sigma}_{kl}, \quad (2)$$

де $k(R)$ – функція, яка залежить від параметра циклу; M_{ijkl} – симетричний тензор четвертого рангу, компоненти якого відображають вплив напрямку головних осей тензора напруження відносно площини симетрії пружних властивостей композиту; n – константа матеріалу; W^e – максимальна за цикл питома енергія пружної деформації. При побудові моделі використовується принцип еквівалентного напруження, згідно якому напруження у фізичних рівняннях для пош-

кожного матеріалу може бути визначене таким же чином, як і для непошкодженого матеріалу, шляхом заміни тензора напруження Коші тензором ефективного напруження. Згідно цьому принципу

$$\frac{dD_{ij}}{dN} = k(R) \cdot \left[\frac{1}{2} C_{mnpq} \tilde{\sigma}_{mn} \sigma_{pq} \right]^n \cdot M_{ijkl} \cdot \tilde{\sigma}_{kl}, \quad (3)$$

де C_{ijkl} – тензор пружних постійних непошкодженого композиту. У певний момент часу щільність мікропошкоджень на одній з площин досягає деякого критичного рівня. Це приводить до якісної зміни характеру процесу. Може відбутися або руйнування композиту унаслідок втрати цілісності або можуть утворитися одна або декілька стійких макроскопічних тріщин при збереженні цілісності композиту. Остаточне руйнування настає, коли розмір однієї або декількох тріщин досягає певного критичного значення. Все це рівносильно тому, що при складному напруженому стані руйнування відбувається, коли виконується умова

$$W^e \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Велике поширення та розвиток в інженерних спорудах отримали тонкостінні елементи конструкцій, в яких реалізується двоосний напружений стан. Тому на наступному етапі аналізувалася запропонована модель для вивчення деформаційної пошкоджуваності в умовах плоского напруженого стану. При плоскому напруженому стані кінетичне рівняння пошкоджуваності (2) спрощується й його можна переписати його в матричній формі як

$$\begin{pmatrix} \frac{dD_{11}}{dN} \\ \frac{dD_{22}}{dN} \\ \frac{dD_{12}}{dN} \end{pmatrix} = k(R) \cdot (W^e)^n \cdot \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{12} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_{11} \\ \tilde{\sigma}_{22} \\ \tilde{\sigma}_{12} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де m_{11} , m_{22} , m_{12} і n – константи, які визначають швидкість накопичення втомних анізотропних пошкоджень, встановлюваних за наслідками експериментів на втомну міцність. Базовими експериментами для визначення характеристик втомного пошкодження композиційного матеріалу є досліди з циклічного навантаження в трьох напрямках. У разі одноосного напруженого стану в одному з головних напрямів пружних властивостей матеріалу і при стаціонарному циклі зміни напруження швидкість накопичення параметра пошкоджуваності D_{11} визначається як

$$\frac{dD_{11}}{dN} = k(R) \cdot (W^e)^n \cdot m_{11} \cdot \tilde{\sigma}_{11}. \quad (6)$$

Згідно принципу еквівалентного напруження можна переписати рівняння (6) в наступній формі

$$\frac{dD_{11}}{dN} = k(R) \cdot \left(\frac{1}{2E_{11}} \cdot \frac{\sigma_{11}^2}{1 - D_{11}} \right)^n \cdot m_{11} \cdot \frac{\sigma_{11}}{1 - D_{11}}. \quad (7)$$

Повне розділення змінних і інтеграція приводить до виразу для міри пошкоджуваності залежно від кількості циклів:

$$D_{11} = 1 - \left(\frac{-k + 2 \cdot m_{11} \cdot k(R) \cdot \sigma_{11}^{2n+1}}{2^n \cdot E_{11}^n} \cdot N_p + 1 \right)^{\frac{1}{n+2}}. \quad (8)$$

де D_{11} – міра пошкоджень, накопичених після N_p циклів; E_{11} – модуль пружності у напрямі 1. Нехай N_f – гранична руйнівна кількість циклів. Йому відповідає $D_{11} = 1$. Це дозволяє визначати S-N залежність, інтегруючи співвідношення (8) в межах від 0 до 1,

$$\sigma_{11} = \left(\frac{2^n \cdot E_{11}^n}{(n+2) \cdot m_{11} \cdot k(R)} \cdot \frac{1}{N_f} \right)^{\frac{1}{2n+1}}. \quad (9)$$

Так само знаходиться залежність параметра пошкоджуваності D_{22} від кількості циклів

$$D_{22} = 1 - \left(\frac{-k + 2 \cdot m_{22} \cdot k(R) \cdot \sigma_{22}^{2n+1}}{2^n \cdot E_{22}^n} \cdot N_p + 1 \right)^{\frac{1}{n+2}}, \quad (10)$$

де E_{22} – відповідний модуль пружності у напрямі 2. Так само можна отримати S-N залежність матеріалу в другому головному напрямку

$$\sigma_{22} = \left(\frac{2^n \cdot E_{22}^n}{(n+2) \cdot m_{22} \cdot k(R)} \cdot \frac{1}{N_f} \right)^{\frac{1}{2n+1}}. \quad (11)$$

Для визначення теоретичного значення параметра пошкоджуваності D_{12} необхідно провести втомні випробування зразків, вирізаних під кутом 45 градусів до напрямів симетрії механічних властивостей. За допомогою формули перетворення компонентів тензорів отримано кінетичне рівняння

$$\frac{dD_{12}}{dN} = k(R) \cdot \left[\frac{1}{8} \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot \nu_{21}}{E_{22}} \right) \cdot \frac{\sigma_{xx}^2}{1 - D_{12}} \right]^n \cdot \left(\frac{1}{4} m_{11} + \frac{1}{4} m_{22} + \frac{1}{4} m_{12} \right) \cdot \frac{\sigma_{xx}}{1 - D_{12}}. \quad (12)$$

Таким чином, теоретичне значення параметра пошкоджуваності D_{12} залежно від кількості циклів визначається як

$$D_{12} = 1 - \left[-k(R) \cdot k + 2 \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot \nu_{21}}{E_{22}} \right) \right)^n \cdot \left(\frac{m_{11}}{4} + \frac{m_{22}}{4} + \frac{m_{12}}{4} \right) \cdot \sigma_{xx}^{2n+1} \cdot N_p + 1 \right]^{\frac{1}{n+2}}. \quad (13)$$

Відповідна теоретична залежність S-N в цьому випадку має вигляд

$$\sigma_{xx} = \left[\frac{1}{k(R) \cdot k + 2 \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot \nu_{21}}{E_{22}} \right) \right)^n \cdot \left(\frac{m_{11}}{4} + \frac{m_{22}}{4} + \frac{m_{12}}{4} \right) \cdot N_f} \right]^{\frac{1}{2n+1}}. \quad (14)$$

За допомогою отриманих кінетичних рівнянь можуть бути описані процеси накопичення анізотропної пошкоджуваності у разі плоского напруженого стану при циклічному навантаженні. Для матеріалів із слабкою залежністю

втомних властивостей від напряму дії напруження може використовуватися модель з скалярним параметром пошкоджуваності D . Кінетичне рівняння пошкоджуваності в цьому випадку набуває вигляду

$$\frac{dD}{dN} = k(R) \cdot m \cdot (W^e)^n, \quad (15)$$

де m і n – константи, які визначаються експериментально. Згідно принципу еквівалентної деформації, питома енергія пружної деформації може бути виражена через ефективне напруження і закон розвитку пошкоджуваності набуває вигляду

$$\frac{dD}{dN} = m \cdot k(R) \cdot \left[\frac{1}{2(1-D)} C_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} \right]^n, \quad (16)$$

де C_{ijkl} – тензор пружних постійних непошкодженого композиту. При випробуваннях на втому у випадку одноосного напруженого стану із стаціонарним режимом зміни напруження залежність параметра пошкоджуваності від кількості циклів визначається шляхом інтеграції рівняння (16) з початковою умовою $D = 0$ при $N = 0$

$$D = 1 - \left(- \frac{n+1}{2^n \cdot E^n} \cdot m \cdot k(R) \cdot \sigma^{2n} \cdot N + 1 \right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (17)$$

де E – модуль пружності відповідного напряму. Втомне руйнування відбувається при $D = 1$. Це приводить до рівняння для визначення граничної кількості циклів до руйнування N_f з постійною амплітудою σ

$$N_f = \frac{2^n \cdot E^n}{n+1 \cdot m \cdot k(R) \cdot \sigma^{2n}}. \quad (18)$$

У третьому розділі описаний метод проведення втомних випробувань для визначення характеристик втомної міцності склопластика. Виготовлено три партії зразків, вирізаних в напрямках ниток основи, утку і по діагоналі (45°) склотканини. Отримані експериментальні дані оброблялися за методом найменших квадратів для ідентифікації параметрів запропонованої моделі. Знайдені параметри використані для оцінки втомної міцності елементів конструкцій, які працюють при циклічних навантаженнях.

Як матеріал для дослідження вибраний стеклотекстолит марки СТЭФ-1, який є макроскопічно ортотропним, що має в плоскості укладання шарів дві ортогональні осі симетрії механічних властивостей, які співпадають з напрямками укладання ниток основи й утка. Випробовувані зразки мали прямокутний поперечний перетин (2×15) мм і довжину 175 мм. Оскільки пружні характеристики склопластиків можуть мати певний розкид і відрізнятися від довідкових даних, то в цьому дослідженні ці характеристики знаходилися динамічним методом – за величинами власних частот згинних коливань, на тих же зразках, які використовувалися для втомних випробувань. Для цієї задачі використовувався вібростенд серії ВЭДС-10А, який знаходиться на кафедрі динаміки та міцності машин НТУ «ХП».

Консольні зразки з робочою довжиною $L = 147$ мм встановлювалися на столику вібратора. Амплітуду й частоту коливань платформи вібростенда можна плавно змінювати в певному діапазоні за допомогою системи управління. Теоретичною основою методу визначення модуля пружності є рівняння вільних згинних коливань стрижня. Визначалося середнє значення першої власної частоти кожної 30 серій зразків, вирізаних у різних напрямках, після визначення якої можна знайти значення модулів пружності зразків відповідних напрямів. Решта фізико-механічних властивостей склопластика прийнята за довідковими даними (табл. 1).

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості склопластика

Модуль пружності (МПа)	Уздовж основи	(E_{11})	5620
	Уздовж утка	(E_{22})	4590
	По діагоналі	(E_{45})	1440

Втомні випробування проводилися на спеціальній установці ДП-5/3, розташованій на кафедрі опору матеріалів НТУ «ХП». Ця установка (рис. 1) призначена для визначення втомного опору згину листових або ниткоподібних зразків.

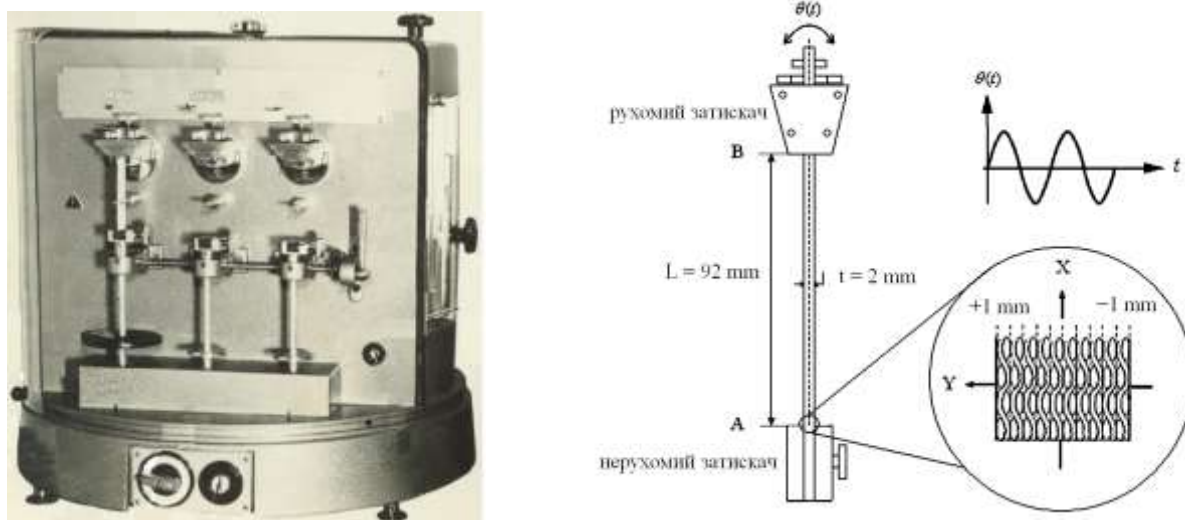


Рис. 1. Установка ДП-5/3 и схема закріплення зразка

При випробуванні контрольованим параметром є кут повороту верхнього затискача, який змінюється за синусоїдальним законом. Установка дозволяє одночасне випробування трьох зразків при однаковому куті згину й при однаковому або різному попередньому натягненні. Величина кута повороту верхнього затискача може встановлюватися в широкому діапазоні від 20° до 180° . Задана частота згинання встановлювалася в двох режимах; 100 або 300 згинів на хвилину. Виконані серії випробувань по п'ять зразків при кутах перегину 60° , 50° , 45° , 40° і 35° на зразках, вирізаних у різних напрямках без попереднього натягнення зразків. Випробування зразків проводилися безперервно до повного руй-

нування. Для зіставності результатів однієї серії зразків випробування проводилися за однакової частоти. Після автоматичного вимкнення приводу унаслідок руйнування зразків встановлювалися кількості згинів за лічильниками.

Теоретичні оцінки напруження засновані на класичній теорії балок. Композиційний зразок розглядався як балка, жорстко защемлена нижнім кінцем, із заданим на верхньому кінці кутом повороту. Експериментальні результати зі втомного руйнування зразків були оброблені за методом найменших квадратів для визначення компонентів тензора пошкоджуваності m_{11} , m_{22} , m_{12} і константи n . Це завдання зводиться до знаходження чисельних значень цих параметрів, при яких функція Q досягає свого мінімуму

$$Q = \sum_{i=1}^j \left[\sigma_{i1}(N_{i1}) - F(N_{f1}, E_{11}, m_{11}, n) \right]^2 + \sum_{i=j+1}^{2j} \left[\sigma_{i2}(N_{i2}) - F(N_{f2}, E_{22}, m_{22}, n) \right]^2 + \sum_{i=2j+1}^{3j} \left[\sigma_{ix}(N_{ix}) - F(N_{fx}, E_{xx}, m_{12}, n) \right]^2, \quad (19)$$

де j – кількість експериментів для кожного з трьох напрямів; $\sigma_{i1}(N_{i1})$, $\sigma_{i2}(N_{i2})$ і $\sigma_{ix}(N_{ix})$ – експериментальні значення амплітудного напруження; F – теоретичне значення напруження, при якому настає руйнування при N_{fi} циклах. При степеневій залежності в кінетичному рівнянні (2) функція Q при фіксованому значенні параметра циклу $k(R) = 1$ набуває вигляду

$$Q = \sum_{i=1}^j \left[\sigma_{i1} - \left(\frac{2^n \cdot E_{11}^n}{(n+2) \cdot m_{11}} \right)^{\frac{1}{2n+1}} \cdot N_{f1}^{\frac{-1}{2n+1}} \right]^2 + \sum_{i=j+1}^{2j} \left[\sigma_{i2} - \left(\frac{2^n \cdot E_{22}^n}{(n+2) \cdot m_{22}} \right)^{\frac{1}{2n+1}} \cdot N_{f2}^{\frac{-1}{2n+1}} \right]^2 + \sum_{i=2j+1}^{3j} \left[\sigma_{ix} - \left((n+2) \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot \nu_{21}}{E_{22}} \right) \right)^n \cdot \left(\frac{m_{11}}{4} + \frac{m_{22}}{4} + \frac{m_{12}}{4} \right) \right)^{\frac{-1}{2n+1}} \cdot N_{fx}^{\frac{-1}{2n+1}} \right]^2. \quad (20)$$

Обробка результатів експериментів над зразками дала наступні значення констант:

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} 1.846 \cdot 10^{-31} & 0 & 0 \\ 0 & 7.512 \cdot 10^{-31} & 0 \\ 0 & 0 & 1.676 \cdot 10^{-30} \end{pmatrix} (\text{Па}^{-n}); n = 2.776. \quad (21)$$

На рис. 2 приведені теоретичні залежності S-N, побудовані за описаними кінетичними рівняннями. Для порівняння показані експериментальні дані у вигляді точок.

У роботі припускається, що функція $k(R)$ при симетричному циклі зміни напруження набуває значення одиниці. Для несиметричних циклів навантаження необхідно провести додаткові експерименти. При обробці цих експериментів компоненти тензора пошкоджуваності m_{11} , m_{22} , m_{12} і показник ступеня n використовують знайдені для симетричного циклу, а значення функції $k(R)$ знаходиться в результаті обробки додаткових експериментів.

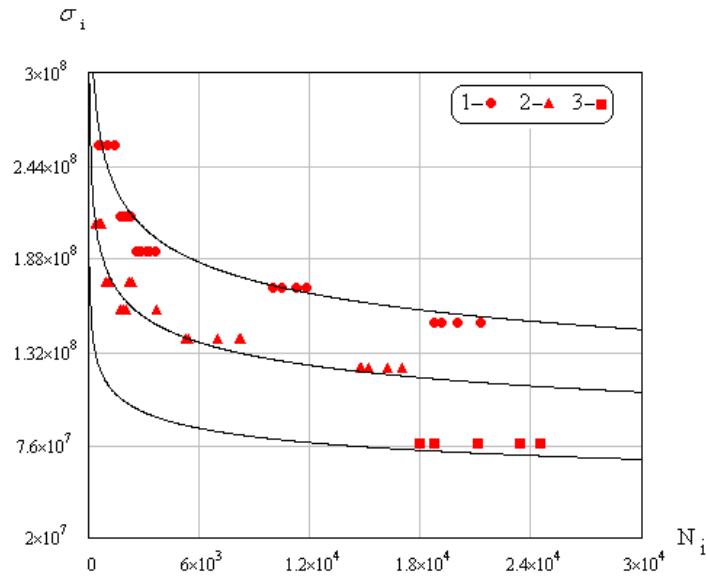


Рис. 2. Крива втоми зразків, вирізаних уздовж:
1) основи; 2) уздовж утка; 3) по діагоналі

На рис. 3 приведені теоретичні криві зростання параметрів пошкоджуваності залежно від кількості циклів до руйнування. Криві побудовані при постійному значенні амплітудного напруження $\sigma = 1.5 \cdot 10^8$ МПа.

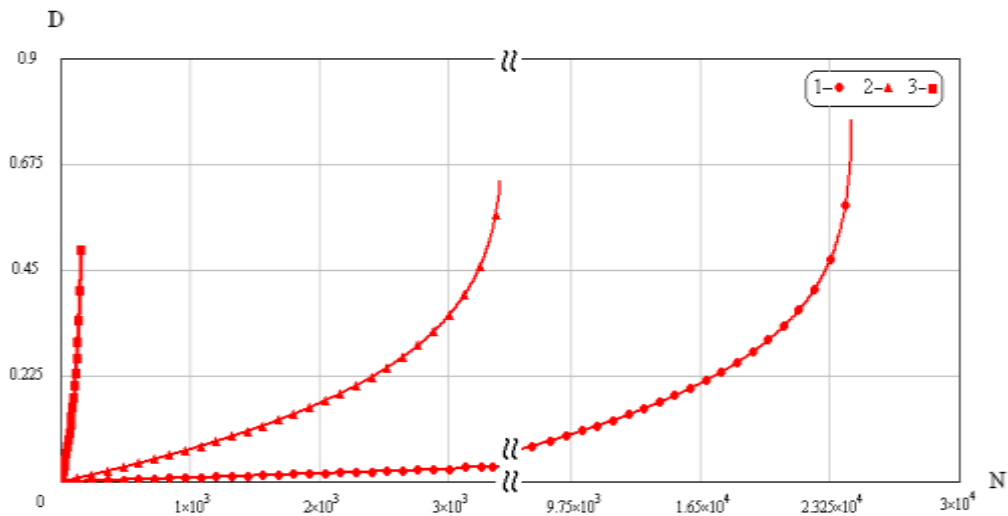


Рис. 3. Зміна параметра пошкоджуваності зразків, вирізаних уздовж:
1) основи; 2) утка; 3) по діагоналі

У четвертому розділі можливості запропонованої моделі продемонстровані на прикладах розрахунків втоми відповідальних елементів конструкцій, виготовлених з композиційних матеріалів – лопаті вітроенергетичної установки, торсіона несучого гвинта конвертоплана й ділянки П-образного компенсатора магістрального трубопроводу із захисним бандажем.

Перша частина розділу присвячена скінченноелементному моделюванню та визначенню втомної міцності лопаті вітрової турбіни при появі резонансу на першій власній частоті. Як об'єкт дослідження вибрана лопать для вітрогенера-

тора V-15, данської компанії Vestas. Вітрогенератор із горизонтальною віссю обертання має потужність 75 кВт. Він має три лопаті довжиною 7.5 м із профілями поперечного перетину серії NACA 44xx. Для отримання даних для скінченноелементного аналізу, в програмному комплексі ANSYS побудована геометрична модель лопаті на основі аеродинамічних характеристик профілю LS(1)-0421. Для моделювання зовнішньої оболонки й внутрішнього каркаса використовувався оболонковий елемент Shell63. Цей елемент задається чотирма вузлами, має шість ступенів свободи в кожному вузлі й підтримує ортотропні властивості матеріалу. Загальний вигляд скінченноелементної моделі конструкції представлений на рис. 4.

Проведено контроль якості створеної скінченноелементної сітки. У якості критерії збіжності використовувався параметр SEPC (відносна погрішність в енергетичній нормі), який має бути менший за 15 %. Задовільне моделювання потребувало 43500 елементів. На першому етапі розрахунку виконаний модальний аналіз, який дозволив отримати власні частоти і відповідні форми коливань конструкції (табл. 2).

Вітрове навантаження задавалося як сума статичної та циклічної складових. У роботі розрахункове значення швидкості вітру прийняте рівним 5 м/с, що забезпечує вихідну потужність вітроелектричного агрегату. Для оцінки втомної міцності використовуємо наступні припущення: 1 – враховується лише ефект дії аеродинамічної сили на лопать; 2 – лопаті під дією цієї сили весь час перебувають в резонансному режимі.

Таблиця 2

Власні частоти лопаті

Форма коливань	1-а форма	2-а форма	3-я форма
Частота коливань (Гц)	3.92	8.17	14.37

Для оцінки механічної поведінки лопаті при згині із крученням, рівномірний нормальний тиск, який дорівнює 200 Па, було прикладено до зовнішніх поверхонь по одній стороні лопаті. Це значення дорівнює статичній складовій тиску вітру, який визначався за картою районування території України за характерними значеннями вітрового тиску в Харківській області та відповідно до набутого розрахункового значення швидкості вітру. Граничні умови задавалися як закріплення всіх 6 ступенів свободи вузлів, які знаходяться в кореневій частині. Проведено статичний аналіз з урахуванням власної ваги лопаті. Пульсаційне значення вітрового навантаження задавалося у формі гармонійного процесу, змінного по синусоїдальному закону, амплітуда якого складає 10 % статичного з частотою, близькою до першої власної частоти. Тому на другому



Рис. 4. Скінченноелементна модель лопаті

етапі розрахунку прикладався рівномірний тиск, рівний 20 Па. Потім виконувалася гармонійний аналіз за діапазоном збуджуючих частот від 0 до 15 Гц, який дозволив отримати амплітудно-частотну характеристику лопаті. За допомогою гармонійного аналізу можна проаналізувати напружений стан лопаті в найбільш небезпечному діапазоні частот. Діапазон збуджуючих частот вибраний так, щоб повністю охоплювати частотний діапазон модального аналізу.

На рис. 5 показана амплітудно-частотна характеристика даної лопаті, яка була побудована для точки, розташованої на кінці лопаті.

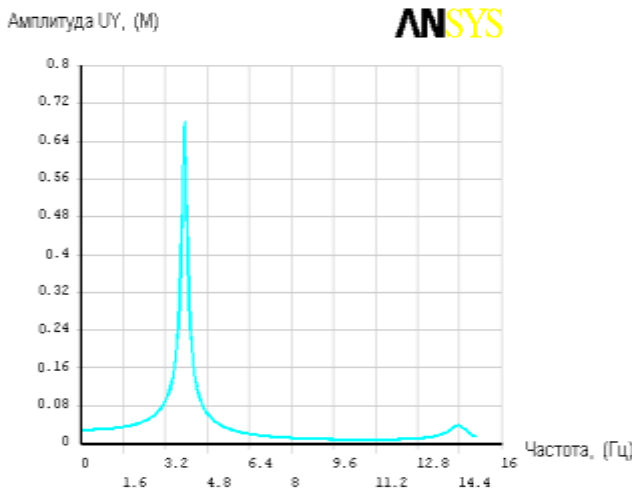


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика лопаті

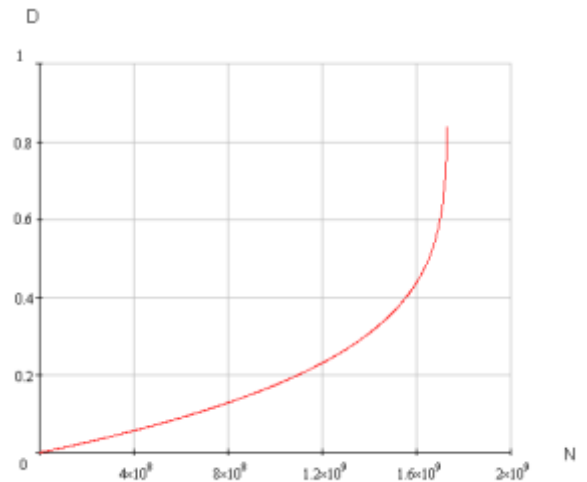


Рис. 6. Розвиток параметра пошкоджуваності

Проведені статичний й гармонійний аналізи даної лопаті показали, що напруження, викликані статичним навантаженням, є незначними в порівнянні з динамічним напруженням на резонансному режимі. Тому при розрахунках для прогнозування втомної міцності враховується тільки ефект дії змінної складової аеродинамічної сили на лопать. Аналіз втомних пошкоджень лопаті виконаний із застосуванням моделі зі скалярним параметром пошкоджуваності (15). Оскільки напруження на площинках, паралельних серединній поверхні оболонок, є знехтувано малі в порівнянні з іншими напруженнями, то напружений стан лопаті можна вважати за двовісним. Залежність параметра ізотропної пошкоджуваності від кількості циклів виглядає як

$$D = 1 - \left[1 - \frac{m \cdot (n+1)}{2^n} \cdot \left(\sigma_{11} \cdot \left(\frac{\sigma_{11}}{E_{11}} - \frac{\nu_{21}}{E_{22}} \sigma_{22} \right) + \sigma_{22} \cdot \left(\frac{-\nu_{12}}{E_{11}} \sigma_{11} + \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} \right) + \frac{\tau_{12}^2}{G_{12}} \right)^n \cdot N_p \right]^{\frac{1}{n+1}}. \quad (22)$$

За критерій руйнування вибирається умова рівності параметра пошкоджуваності одиниці. Якщо $D = 1$, то можна отримати кількість циклів N_f до руйнування

$$N_f = \frac{1}{\frac{m \cdot (n+1)}{2^n} \cdot \left(\sigma_{11} \cdot \left(\frac{\sigma_{11}}{E_{11}} - \frac{\nu_{21}}{E_{22}} \sigma_{22} \right) + \sigma_{22} \cdot \left(\frac{-\nu_{12}}{E_{11}} \sigma_{11} + \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} \right) + \frac{\tau_{12}^2}{G_{12}} \right)^n}. \quad (23)$$

Матеріальні параметри, які входять в рівняння (22) і (23), визначають

швидкість накопичення ізотропного пошкодження. Вони визначені для матеріалу СТЭФ-1 в результаті обробки експериментальних даних за методом найменших квадратів

$$m = 1.034 \cdot 10^{-27} \text{ (Па}^{-n}\text{)}; n = 3.521. \quad (24)$$

Оскільки максимум амплітуди відповідає першій власній частоті, яка дорівнює $f = 3.92$ Гц, знайдені екстремальні значення координатного напруження, відповідного цій частоті. Значення координатного напруження, що входить в рівняння (22) і (23) отримані в результаті гармонійного аналізу. Це напруження для частоти $f = 3.92$ Гц в найбільш навантаженій точці дорівнює:

$$\sigma_{11} = 0.268 \cdot 10^8 \text{ (Па)}; \sigma_{22} = 0.139 \cdot 10^8 \text{ (Па)}; \tau_{12} = 0.102 \cdot 10^7 \text{ (Па)}. \quad (25)$$

На основі рівняння (23) кількість циклів до руйнування визначене як $N_f = 1.7 \times 10^9$. За допомогою рівняння (22) також можна змоделювати розвиток параметра пошкоджуваності D відносно кількості циклів N , як показано на рис. 6. Проведений розрахунок на втомну міцність конструкції дозволяє прогнозувати термін служби лопаті не менше 120000 годин. Розрахунок виконаний в припущенні, що лопаті вітрогенератора працюють весь час в резонансному режимі. Практика експлуатації вітроустановок показує, що резонансні режими займають не більше 10-20 % загального часу роботи. З урахуванням цієї обставини реальна довговічність лопатей складе не менше 90 років. Оскільки термін служби сучасних вітрових турбін складає від 20 до 30 років, можна прийти до висновку, що за критерієм втомної міцності лопаті є цілком працездатними.

У другій частині досліджено пружний елемент, що сполучає лопать несучого гвинта конвертоплана V-22 Osprey з головним приводним валом. Знайдено кількість циклів до руйнування при періодичному навантаженні з частотою, відповідною номінальним оборотам гвинта.

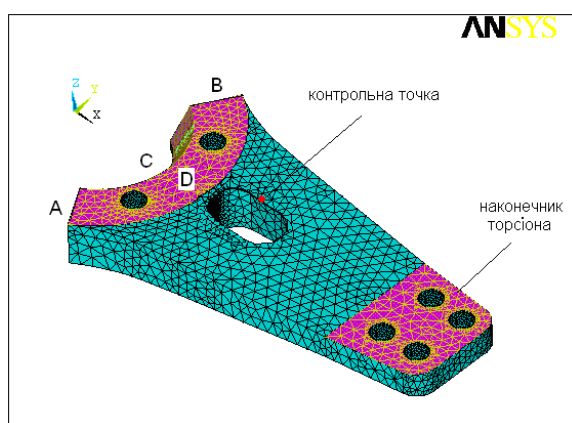


Рис. 7. Загальний вид скінченноелементної моделі торсіона

Торсіон є жорстким пружним елементом з трьома конічними плечима, розташованим одне від одного під кутом 120 градусів. Для забезпечення даних для скінченноелементного міцностного розрахунку побудова геометричної моделі торсіона здійснювалася в програмному комплексі ANSYS. Через симетрію геометричної моделі і характер навантаження розглядається тільки третина реальної конструкції.

Створювалася скінченноелементна сітка двадцяти вузлових скінченних елементів Solid95, які мають форму трикутної призми. Як граничні умови задавалися умова симетрії на площинах A і B, також жорстке закріплення на циліндричній поверхні C і площині D (рис. 7). Для оцінки якості скінченноелементної моделі проведена серія порівняльних розрахунків з різною кількістю елеме-

нтів. Критерієм збіжності була стабілізація еквівалентного напруження й прогин контрольної точки. Розв'язувалася статична задача при різних кількостях елементів. Чисельні дослідження показали, що згущування сітки приводить до стабілізації результатів на сітках з більш ніж 30000 елементів. Все подальші розрахунки виконувалися на сітці з 39077 елементів.

Для оцінки втомної міцності конструкції враховуються тільки дія аеродинамічної підйомної та відцентрової сили на втулку несучого гвинта й на відповідний торсіон. Підйомна сила прийнята рівній максимальній злітній силі, яка в десантно-транспортному випадку конвертоплана складає 274000 Н. Оскільки кількість обертів кожної лопаті конвертоплана V-22 Osprey складає 333 обертів в хвилину, визначення втомної міцності проводиться на частоті $f = 5.5$ Гц для площин, що знаходяться на поверхні торсіона. Оскільки ця частота далеко від першої власної частоти торсіона, то можна перекопатися, що резонансу лопаті з торсіоном не відбувається. Виникаючі напруження від дії підйомної й відцентрової сил та відповідного згинного моменту мають як постійні, так і змінні складові. Спільна дія постійної та змінної нормального й дотичного напружень спричиняє втомну пошкоджуваність гнучкої частини торсіона. Тут за аналогією з розрахунком вітроенергетичної лопаті передбачається, що гармонійний відгук торсіона змінюється за синусоїдальним законом, амплітуда якого складає 10 % статичних навантажень із частотою поблизу до 5.5 Гц.

Перш ніж виконати гармонійний аналіз, потрібно переходити від асиметричного циклу навантаження до симетричного. Для опису такого переходу застосовувалася залежність Гудмана, яка зв'язує амплітуду напруження еквівалентного за пошкоджуваністю симетричного циклу навантаження $\sigma_{a\ eq}$ з амплітудною σ_a і середнім напруженням σ_m даного асиметричного циклу навантаження. Залежність Гудмана виглядає як

$$\sigma_{a\ eq} = \sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \cdot \sigma_m, \quad (26)$$

де σ_B – границя міцності і σ_{-1} – границя втоми при симетричному циклі навантаження. Оскільки $\sigma_B = 220$ МПа і $\sigma_{-1} = 20$ МПа для даного матеріалу, то можна припустити, що $\sigma_{a\ eq} \approx 2\sigma_a$. Тому на цьому етапі розрахунку в середовищі ANSYS прикладався новий тиск, який становить 20 % статичних на наконечник торсіона. Потім виконувався гармонійний аналіз у частотному діапазоні (4-8) Гц і досліджувалася динамічна навантаженість торсіона на кожній частоті.

Оскільки на поверхнях торсіона третє головне напруження дорівнює нулю $\sigma_{33} = 0$, то максимальні пошкодження накопичуються в головній площині, відповідній головним напруженням σ_{11} і σ_{22} . Тому з гармонійного рішення визначалася це головне напруження в даній частоті як:

$$\sigma_{11} = 0.302 \cdot 10^8 \text{ (Па)}; \sigma_{22} = 0.528 \cdot 10^7 \text{ (Па)}. \quad (27)$$

Для аналізу втомних пошкоджень торсіона застосовувалася модель анізотропної пошкоджуваності (2). У матричній формі кінетичне рівняння пошкоджуваності має вигляд

$$\frac{d}{dN} \begin{pmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{V} e^{-\frac{\cdot}{n}} \cdot \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Аналіз накопичення пошкоджуваності приводиться до розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь з початковими умовами на шукані функції. Початкові умови в цьому випадку є $D_{11} = 0$ і $D_{22} = 0$ при $N = 0$, оскільки в початковий момент навантаження відсутні пошкодження. Вбудована Функція $rkfixed(Y_0, N_0, N_k, M, D)$ є однією з функцій в Mathcad 11, яка використовує метод Рунге-Кутта з фіксованим кроком для розв'язання цієї задачі. Задаються вектор початкових значень в точці, початкові й кінцеві точки розрахунку $N = 0$ і N_k , кількість кроків M , на яких чисельний метод знаходить рішення. Міняючи значення кінцевої точки розрахунку N_k можна знайти відповідні значення параметрів пошкоджуваності:

$$D_{11} = 0.887 ; D_{22} = 0.454 \text{ при } N_k = 9.929 \cdot 10^8. \quad (29)$$

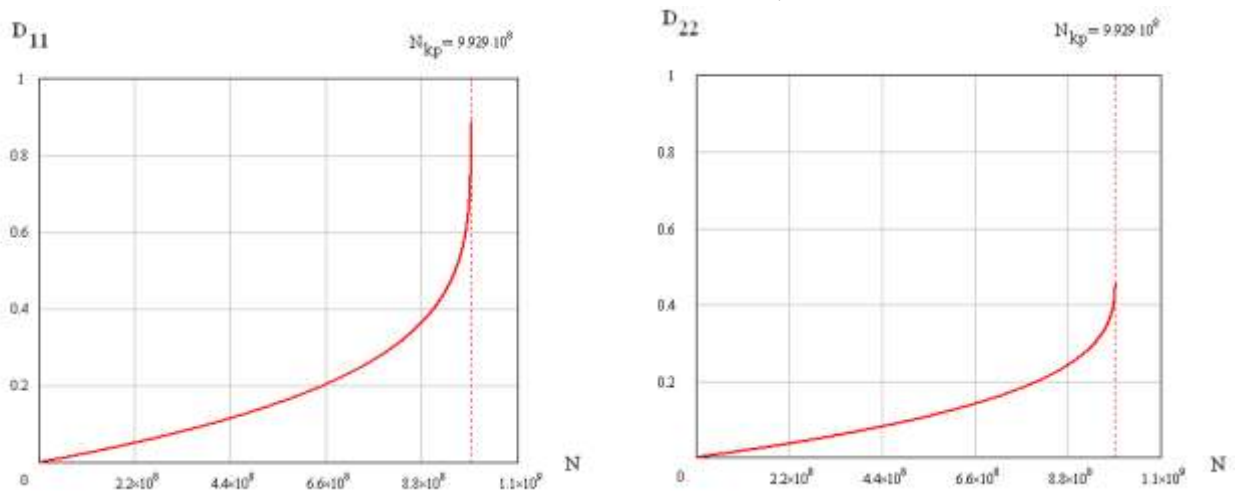


Рис. 8. Зміна параметрів пошкоджуваності торсіона

Для отримання задовільної кількості кроків M будувалися фазові портрети розв'язання системи при різній кількості кроків. Кількість кроків, що задаються, поступово збільшувалося, поки вийшло гладке рішення при кількості кроків рівному 10000. На рис. 8, представлені діаграми зміни параметрів пошкоджуваності $D_{11}(N)$ і $D_{22}(N)$ залежно від кількості циклів.

В кінці розділу побудована геометрична модель відремонтованої ділянки П-образного компенсатора магістрального трубопроводу із захисним бандажем з склопластика. Створена скінченноелементна сітка двадцяти

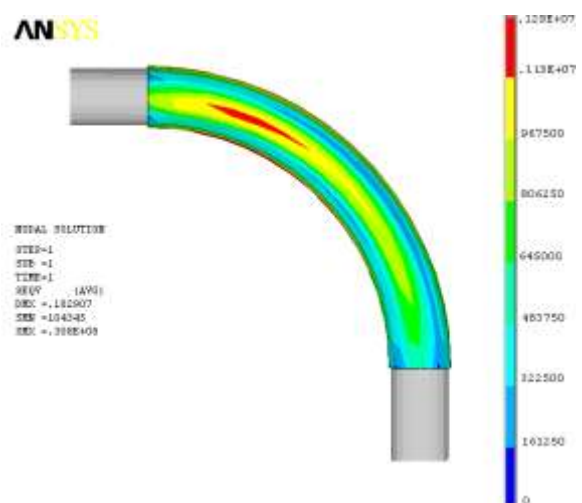


Рис. 9. Розподіл еквівалентного напруження в покритті

вузлових скінченних елементів Solid95 і виконаний розрахунок напружень при циклічній зміні температури. Дослідження втомної міцності по моделі з анізотропною пошкоджуваності показало, що конструкція є працездатною.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлена та розв'язана задача побудови теоретичної моделі накопичення втомних анізотропних пошкоджень в композиційних матеріалах. Основні наукові та практичні результати виконаних досліджень є наступними:

1. Проведено аналіз існуючих і сучасних моделей і методів визначення втомної міцності композиційних матеріалів в науково-технічних джерелах на підставі, якого сформульовані задачі дослідження.
2. У роботі обґрунтовано модель втоми композиційних матеріалів на основі континуальної механіки пошкоджуваності. Введення тензорних параметрів пошкоджуваності дозволило відобразити анізотропію властивостей композиційних матеріалів для багатоциклової втоми та запропонувати нові інваріантні кінетичні рівняння розвитку пошкоджуваності.
3. Виконані експериментальні дослідження втоми склопластика й розроблена методика ідентифікації параметрів теоретичної моделі для випадку двовісного напруженого стану на основі базових експериментів.
4. Розроблена методика чисельного аналізу багатоциклової втоми елементів конструкцій з використанням поєднання комерційних програмних пакетів і власного програмного забезпечення.
5. Можливості запропонованої моделі продемонстровані на прикладах розрахунків втоми відповідальних елементів конструкцій, виготовлених із композиційних матеріалів – лопаті вітроенергетичної установки, торсіона несучого гвинта конвертоплана й ділянки П-образного компенсатора магістрального трубопроводу із захисним бандажем.
6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ході виконання європейського гранту № PIRSES-GA-2012-318874 в рамках 7-ої рамочної програми європейського союзу в НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Моваггар А. Энергетическая модель усталостной прочности композиционных материалов / А. Моваггар, Г. И. Львов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – № 37. – С. 111-122.

Здобувачеві належить виведення визначального співвідношення скалярної пошкоджуваності.

2. Моваггар А. Анизотропная модель усталостной повреждаемости стекловолоконного композита / А. Моваггар, Г. И. Львов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – № 52. – С. 119-127.

Здобувачеві належить запропонована тензорна міра пошкоджуваності.

3. Моваггар А. Экспериментальное исследование усталостной прочности стекловолоконного композита СТЭФ-1 / А. Моваггар, Г. И. Львов // Проблемы прочности. – Київ: ПІМ НАН України. – 2012. – № 2(416). – С. 145-155.

Здобувачеві належить експериментальне дослідження процесу накопичення ізотропних пошкоджень в скловолоконному композиті STEF-1.

4. Movaghghar A. Theoretical and experimental study of fatigue strength of plain woven glass/epoxy composite / A. Movaghghar, G. I. Lvov // Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering. – Ljubljana, Slovenia: Faculty of mechanical engineering. – 2012. – Vol. 58. – № 3. – P. 175-182.

Здобувачеві належить теоретичне та експериментальне дослідження процесу накопичення ізотропних пошкоджень в скловолоконному композиті STEF-1.

5. Movaghghar A. A method of estimating wind turbine blade fatigue life and damage using continuum damage mechanics / A. Movaghghar, G. I. Lvov // International Journal of Damage Mechanics. – London, England: Sage Publications Ltd. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 28-39.

Здобувачеві належить визначення втомної міцності лопаті вітрової турбіни на основі ізотропної моделі пошкоджуваності.

6. Movaghghar A. An energy model for fatigue life prediction of composite materials using continuum damage mechanics / A. Movaghghar, G. I. Lvov // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications. – 2012. – Vol. 110-116. – P. 1353-1360.

Здобувачеві належить виведення кінетичного рівняння ізотропної пошкоджуваності.

7. Movaghghar A. An energy model for fatigue life prediction of composite materials using continuum damage mechanics / A. Movaghghar, G. I. Lvov // International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2010): proceedings, 26-28 November 2010. – Kuala Lumpur, Malaysia. – P. 275-279.

Здобувачеві належить виведення визначального співвідношення скалярної пошкоджуваності.

8. Моваггар А. Енергетична модель втомної міцності композитів / А. Моваггар, Г. І. Львов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я; тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, 12-14 травня 2010 р. – Харків: НТУ«ХП», 2010. – С. 73.

Здобувачеві належить виведення визначального співвідношення скалярної пошкоджуваності.

9. Movaghghar A. An anisotropic fatigue damage model for fiberglass composite / A. Movaghghar, G. I. Lvov // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я; тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, 01-03 червня 2011 р. – Харків: НТУ«ХП», 2011. – С. 61.

Здобувачеві належить запропонована тензорна міра пошкоджуваності для скловолоконного композиту.

10. Movaghghar A. Simulation of fatigue failure in a V-22 Osprey helicopter

composite propotor yoke / A. Movaghghar, G. I. Lvov // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я; тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, 15-17 травня 2012 р. – Харків: НТУ«ХПІ», 2012. – С. 38.

Здобувачеві належить визначення втомної міцності торсіона конвертоплана V-22 Osprey.

11. Movaghghar A. Simulation of fatigue failure in a GFRP based composite wind turbine blade / A. Movaghghar, G. I. Lvov // International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics (X-Mech 2012): proceedings, 06-07 March 2012. – Tehran, Iran. – P. 275-279.

Здобувачеві належить побудова скінченноелементної моделі та розрахунків втомної міцності лопаті вітрової турбіни.

АНОТАЦІЇ

Моваггар А. Розробка моделі втоми композиційних матеріалів на основі континуальної механіки пошкоджуваності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Харків, 2013.

У дисертаційній роботі розв'язана задача побудови теоретичної моделі накопичення втомних анізотропних пошкоджень в композиційних матеріалах. Приймається гіпотеза про те, що швидкість накопичення втомних анізотропних пошкоджень в композиті залежить від максимальної за цикл енергії пружної деформації, параметра циклу, поточного рівня пошкодження й амплітудного напруження. Як міра анізотропної пошкоджуваності використаний симетричний тензор другого рангу. Введення тензорних параметрів пошкоджуваності дозволило відобразити анізотропію властивостей композиційного матеріалу для багатоциклової втоми й запропонувати нові інваріантні кінетичні рівняння розвитку пошкоджуваності. Виконано експериментальні дослідження втоми склопластика й розроблена методика ідентифікації параметрів теоретичної моделі для випадку двовісного напруженого стану на основі базових експериментів. Отримані залежності були використані на прикладах розрахунків втоми відповідальних елементів конструкцій, виготовлених з композиційних матеріалів – лопаті ветроенергетической установки V-15, торсіона несучого гвинта конвертоплана V-22 Osprey й ділянки П-образного компенсатора магістрального трубопроводу із захисним бандажем.

Ключові слова: композиційні матеріали, граничний стан, втома, механіка пошкоджуваності, руйнування, накопичення анізотропних пошкоджень, двовісний напружений стан.

Моваггар А. Разработка модели усталости композиционных материалов на основе континуальной механики повреждаемости. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Харьков, 2013.

Композиционные материалы получают все возрастающее применение в современной промышленности, особенно в тех отраслях, где критически важно обеспечивать прочность элементов конструкций при минимальном весе. Определение усталостной прочности в композиционных материалах требует разработки специальных теоретических моделей и критериев. Вследствие сложности и разнообразия механизмов разрушения и накопления усталостных повреждений в композитах, трудно ожидать появления универсальной теории, пригодной для различных композитов при произвольных программах циклического нагружения. Механизм разрушения в композиционных материалах при циклических нагружениях существенным образом зависит от структуры и свойств материалов композита, вида и программы нагружения. Ситуация осложняется тем, что с одной стороны теоретические соотношения усталостной прочности композиционных материалов включают большое число экспериментально определяемых параметров, с другой стороны экспериментальные исследования усталости композитов являются весьма дорогостоящими и длительными. Остается неисследованным вопрос о количественной оценке накопления усталостных анизотропных повреждений в реальных конструкциях из композиционных материалов. В то же время потребности практики требуют развития аналитического и численного моделирования накопления усталостных повреждений с учетом анизотропии. Моделирование анизотропной поврежденности является предметом интенсивных исследований уже на протяжении трех последних десятилетий. Широкое использование композиционных материалов в конструкциях, работающих при циклических нагружениях, привело к созданию различных эмпирических моделей и критериев, не только резко контрастирующих, но и противоречащих друг другу.

Таким образом, возникает актуальная задача, связанная с разработкой частных теорий усталостной прочности композитов, пригодных для определённых классов композиционных материалов с минимальным набором требуемых экспериментов для верификации определяющих соотношений. В этом контексте перспективным является использование подходов, основанных на современной механике континуальной повреждаемости.

В диссертационной работе решена актуальная и практическая задача построения теоретической модели накопления усталостных анизотропных повреждений в композиционных материалах. Принимается гипотеза о том, что скорость накопления усталостных анизотропных повреждений в композите зависит от максимальной за цикл энергии упругой деформации, параметра цикла, текущего уровня повреждения и амплитудных напряжений. В качестве меры анизотропной поврежденности использован симметричный тензор второго ранга. Выполнены экспериментальные исследования усталости стеклопластика и разработана методика идентификации параметров теоретической модели для случая двухосного напряженного состояния на основе базовых экспериментов.

Полученные зависимости были использованы на примерах расчетов усталости ответственных элементов конструкций, изготовленных из композиционных материалов – лопасти ветроэнергетической установки V-15, торсиона несущего винта конвертоплана V-22 Osprey и участка П-образного компенсатора магистрального трубопровода с защитным бандажом.

Ключевые слова: композиционные материалы, предельное состояние, усталость, механика повреждаемости, разрушение, накопление анизотропных повреждений, двухосное напряженное состояние.

Movaghghar A. Development of a fatigue model for composite materials using continuum damage mechanics. – Manuscript.

Dissertation submitted for obtaining the degree of candidate of technical Sciences in specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Ministry of education and science, youth and sport of Ukraine, Kharkov, 2013.

Thesis proposes a theoretical model to evaluate the accumulated anisotropic fatigue damage in composite materials. The damage model is within the thermodynamics constitutive framework and is based on the assumption that the rate of anisotropic fatigue damage accumulation in composite depends on the maximum per cycle elastic strain energy, cycle parameter, the current level of stresses and damage. The model allows to predict fatigue durability by taking into account the principal directions of stress tensor relative to the planes of elastic symmetry of material. With reasonable generality, as a measure of anisotropic damage a symmetric second rank tensor was used. Experimental studies of fatigue strength of glass-fiber based composite laminates then were performed in order to identify the proposed model parameters for the case of biaxial stress state. The obtained dependencies were used to calculate the fatigue lives of critical structural components made of composite materials - blade of a V-15 wind turbine, V-22 Osprey helicopter proprotor yoke and pipeline section including thermal expansion loop with protective coating.

Key words: composite materials, limit condition, fatigue, damage mechanics, fracture, anisotropic damage accumulation, plain stress condition.



МОВАГГАР АЛІ

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВТОМИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ОСНОВІ КОНТИНУАЛЬНОЇ МЕХАНІКИ ПОШКОДЖУВАНOSTI

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
к.т.н, доцент Трубаєв О.І.

Підписано до друку 08.01.2013 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Друк – різнографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 085093

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16