

УДК 539.375: 629.735.33

ББК 0530-016.433.33-070.2 + В 251.630.380.401.8

О.А. Шевченко, Е.П. Боженко

ВПЛИВ АНІЗОТРОПІЇ МАТЕРІАЛУ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН БІЛЯ ТРІЩИНИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглянуто розв'язання задачі про визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщини в ізотропній і анізотропній (ортотропній) пластинах при дії локальних навантажень. На основі числового аналізу знайдені й показані графічно координати прикладення сил біля тріщини, що призводять до рівних і максимальних значень коефіцієнта інтенсивності напружень з урахуванням анізотропії матеріалу.

Широке застосування в сучасних авіаційних, космічних і інших конструкціях полімерних композиційних матеріалів змушує використовувати методи і програми розрахунку, в яких враховуються анізотропні властивості даних матеріалів. Використання при проектуванні конструкцій принципу "безпечного пошкодження", а також задоволення зростаючим вимогам щодо їхньої міцності змушує проводити аналіз цих елементів у разі наявності пошкоджень і тріщин. Тріщини можуть бути також визначені як типові граничні пошкодження плоских елементів конструкцій з полімерних композиційних матеріалів. У зв'язку з високими вимогами до ефективності авіаційних конструкцій певної актуальності набуває проблема ремонту елементів з пошкодженнями і тріщинами, особливо елементів з полімерних композиційних матеріалів через їхню високу вартість.

Ряд робіт присвячено дослідженню впливу підкріплень і стрингерів на плоскі елементи з тріщинами [1; 2]. Питання керування процесом руйнування і напруженим станом біля тріщини розглянуті в монографії [3] і роботі [4], однак питання впливу анізотропії на розподіл напружень біля тріщини досліджений недостатньо.

Розглянемо задачу про визначення напруженого стану біля тріщини в анізотропній (ортотропній) пластині, що знаходиться в умовах плоского напруженого стану під дією довільної системи об'ємних навантажень $X(x,y)$, $Y(x,y)$, які діють симетрично площини тріщини. Вважаємо, що осі прямокутної системи координат xOy перпендикулярні площинам пружної симетрії матеріалу і площина тріщини розташована на осі x , займаючи на ній відрізок $[-l, +l]$.

Розв'язок даної загальної задачі теорії пружності проводився зведенням її до двох більш простих через застосування методу редукції [5]. У першій задачі, застосовуючи до рівнянь рівноваги і сумісності деформацій експонентне перетворення Фур'є, а потім формулу перетворення і теорему про згортки, знаходимо вираз для нормальних напружень на лінії тріщини $\sigma_y(x,0)$ в такому вигляді:

$$\sigma_y^{(1)}(x,0) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_0^{\infty} [p_{21}(x-\xi,\eta)X(\xi,\eta) + p_{22}(x-\xi,\eta)Y(\xi,\eta)] d\eta; \quad (1)$$

$$p_{21}(x,y) = x \frac{a_{11}(m^2 - a_{66}/2)x^2 + [a_{12}(2m^2 - \sqrt{a_{11}a_{22}} - a_{11}a_{22})]y^2}{2\sqrt{2\pi m R_1}};$$

$$p_{22}(x,y) = -y \frac{\sqrt{a_{11}}(m^2 - a_{66}/2)x^2 + \sqrt{a_{12}}(m^2 + a_{66}/2)y^2}{2\sqrt{2\pi m R_1}},$$

де $p_{21}(x,y)$ і $p_{22}(x,y)$ – елементи фундаментального розв'язку для ортотропного тіла; a_{ij} – пружні константи; $m^2 = a_{12} + a_{66}/2 + \sqrt{a_{11}a_{22}}$; $R_1 = a_{11}x^4 + (2a_{12} + a_{66})x^2y^2 + a_{22}y^4$.

Для ізотропного тіла нормальні напруження на лінії тріщини $\sigma_y(x;0)$ можуть бути визначені з виразу (1). Елементи фундаментального розв'язку p_{21}^* і p_{22}^* для ізотропного тіла отримуємо шляхом граничного переходу і підстановки у формули для p_{21} і p_{22} значень технічних констант E і ν для ізотропної пластини замість пружних констант ортотропного матеріалу відповідно до рівностей $a_{11} = a_{22} = 1/E$, $a_{66} = 2(1+\nu)/E$, $a_{12} = -\nu/E$. У такий спосіб для ізотропної пластини в умовах плоского напруженого стану маємо

$$p_{21}^*(x,y) = x \frac{(1-\nu)x^2 - (1+3\nu)y^2}{4\pi(x^2 + y^2)^2}; \quad p_{22}^*(x,y) = -y \frac{(1-\nu)x^2 - (1+3\nu)y^2}{4\pi(x^2 + y^2)^2} \quad (2)$$

Друга задача полягає в пошуку розподілу напружень у напівплощині, з огляду на знайдений розподіл напружень (1) і змішані граничні умови на лінії тріщини при $y=0$:

$$\begin{aligned} \sigma_y(x,0) &= -\sigma_y^{(1)}(x,0), & -l < x < l, \\ \nu(x,0) &= 0, & l \leq |x| < \infty, \\ \tau_{xy}(x,0) &= 0, & -\infty < x < \infty, \end{aligned}$$

де $\sigma_y^{(1)}(x,y)$ – напруження при $y=0$ (1), знайдене з розв'язку першої задачі.

Розв'язок даної задачі, який задовольняє умовам на нескінченності, було отримано в роботі [5].

У задачах механіки руйнування для пружних анізотропних тіл, так само як і для ізотропних, основна увага приділяється визначенню коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН), якими цілком описується напружено-деформований стан біля кінчика тріщини і може бути оцінений граничний стан елементів із тріщинами. Тому в даній задачі обмежимося визначенням КІН в ортотропній та ізотропній пластині із тріщиною при дії заданих об'ємних навантажень $X(x,y)$, $Y(x,y)$, симетричних до площини тріщини.

При дії в пластині довільного об'ємного навантаження X і Y , симетричного до площини тріщини (осі x), коефіцієнти інтенсивності напружень для кінців тріщини з координатами $\pm l$ [5] для ортотропної пластини визначаються за формулою

$$K_I^{\pm} = \frac{2}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \left(\frac{l \pm x}{l \mp x} \right)^{1/2} dx \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} [p_{21}(x-\xi, \eta)X(\xi, \eta) + p_{22}(x-\xi, \eta)Y(\xi, \eta)] d\xi d\eta \quad (3)$$

Формула для визначення K_I в ізотропній пластині має вигляд, аналогічний формулі (3), тільки замість p_{21} і p_{22} використовуються елементи фундаментального розв'язку p_{21}^* і p_{22}^* , обумовлені виразами (2).

Коефіцієнти інтенсивності напружень при дії однакових сил у напрямку осі y у кілька разів (до одного порядку) більше, ніж КІН від дії таких самих сил у напрямку осі x [6]. Тому в подальших розрахунках обмежимося розглядом дії об'ємного навантаження Y . Дане навантаження $Y(x,y)$, як і будь-яке інше, з достатнім ступенем точності може бути замінено системою зосереджених сил P_j ($j = 1..m$), які паралельні осі y . Системою зосереджених сил може бути представлена також дія стрингерів і накладок на елемент із тріщиною. Тому визначимо значення КІН для кінців тріщини від дії прикладених симетрично до її площини двох зосереджених сил інтенсивністю P , що моделюють граничний випадок локально прикладених навантажень. Використовуючи узагальнену δ -функцію, вирази для X і Y у цьому випадку можна записати так:

$$X(x,y) = 0, \quad Y(x,y) = P\delta(x-\xi) \{ \delta(y-\eta) - \delta(y+\eta) \} \quad (4)$$

Знайдемо значення КІН, підставивши вираз (4) у формулу (3). Для більшості ортотропних полімерних композиційних матеріалів характеристичне рівняння $a_{11}\beta^4 - (2a_{12} + a_{66})\beta^2 + a_{22} = 0$ має дійсні корені β_1^2 і β_2^2 . Вираз для визначення КІН від дії зосереджених сил (4) для таких матеріалів з використанням властивості δ -функції отримано в кінцевому вигляді [5]:

$$K_j^\pm(x_j, y_j) = \frac{P}{\sqrt{2\pi l}} \left[\frac{1+D}{Q_j^\pm(\beta_1)} + \frac{1-D}{Q_j^\pm(\beta_2)} \right], \quad (5)$$

$$Q_j^\pm(\beta) = \left\{ \left[1 + (1 \mp B_j)^2 / \beta^2 H_j^2 \right] \left[B_j^2 + \beta^2 H_j^2 - 1 + \sqrt{(B_j^2 + \beta^2 H_j^2 + 1)^2 - 4B_j^2} \right] \right\}^{1/2},$$

де $D = a_{66} / a_{11}(\beta_1^2 + \beta_2^2)$, $B_j = x_j / l$, $H_j = y_j / l$.

Для ізотропних матеріалів значення КІН $K_j^*(x_j, y_j)$ для кінця тріщини з координатою $+l$ визначається чисельно за квадратичною формулою Гаусса [7], що дозволяє врахувати особливість при обчисленні інтеграла (3):

$$K_j^*(x_j, y_j) = \frac{2Pl}{\sqrt{\pi l}} \sum_{i=1}^N W_i p_{22}^*(x_i, y), \quad (6)$$

де $W_i = 2\pi\xi_i / (2N+1)$, $\xi_i = \cos^2 \left[\frac{(2i-1)\pi}{(2\pi+1)} \right]$, $x_i = l(1+2\xi_i)$.

Для дослідження впливу анізотропії на значення КІН для тріщин у пластинах при дії локальних навантажень був обраний сильно анізотропний композиційний матеріал – однонаправлений вуглепластик, що має такі технічні і пружні характеристики: $E_1 = 1/a_{11} = 170 \cdot 10^4$ МПа; $E_2 = 1/a_{22} = 0,67 \cdot 10^4$ МПа; $G_{12} = 1/a_{66} = 0,52 \cdot 10^4$ МПа; $\nu_{12} = a_{12}/a_{11} = 0,29$. У розрахунках даний вуглепластик поданий як квазіоднорідний ортотропний матеріал з усередненими пружними характеристиками. Локальні навантаження у розрахунках задані двома зосередженими силами, прикладеними симетрично до площини тріщини в місцях з відносними координатами (B, H) і $(B, -H)$. Сили спрямовані від площини тріщини і мають однакову вздовж товщини пластини інтенсивність P .

Розрахунки відносних значень КІН ($\bar{K} = K_1 / (P/\sqrt{\pi l})$) виконувалися згідно з розробленою програмою на мові Turbo Pascal 7.0 з використанням формули (5) для ортотропного матеріалу і (6) для ізотропного. Результати розрахунків подані на рис. 1 і 2 у вигляді графіків зміни \bar{K} для двох вибраних значень відносної відстані H .

Для візуалізації впливу анізотропії значення КІН на кожному рисунку побудовано три графіки. 1 – зміна \bar{K} для випадку, коли тріщина вздовж напрямку більшої твердості анізотропної пластини $E_x \gg E_y$ (тріщина вздовж волокон); 2 – для випадку, коли тріщина поперек напрямку більшої твердості пластини $E_y \gg E_x$ (тріщина поперек волокон); 3 – для тріщини в пластині з ізотропного матеріалу. Виконанням оптимізаційних розрахунків отримані координати точок, у яких прикладення сил призводить до максимальних значень \bar{K} . Лінії знайдених значень координат точок для аналогічних попереднім варіантів анізотропії властивостей матеріалів показані на рис. 3.

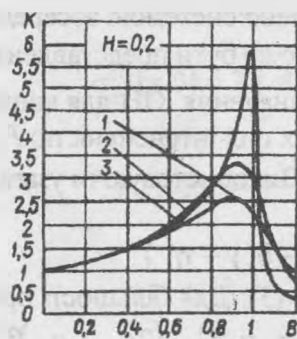


Рис. 1

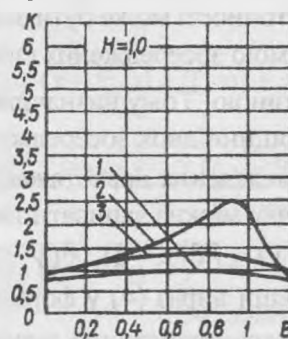


Рис. 2

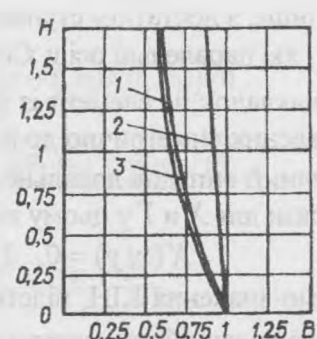


Рис. 3

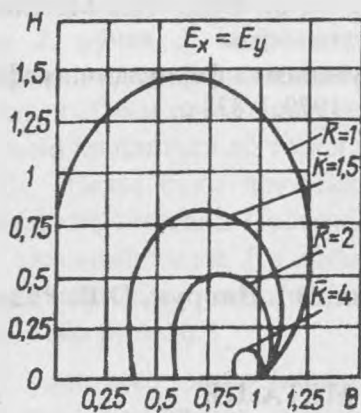


Рис. 4

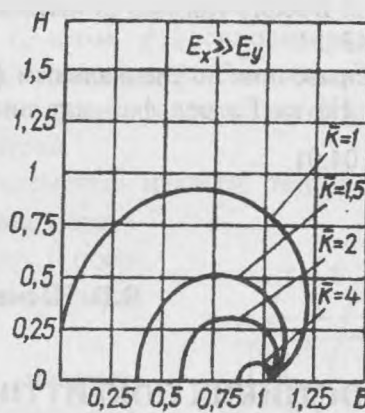


Рис. 5

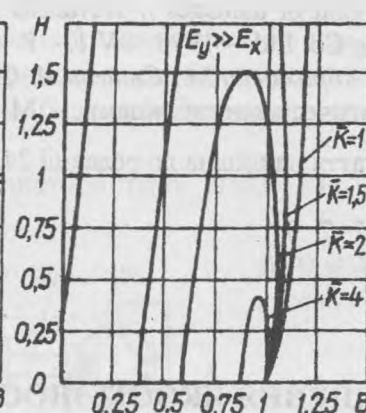


Рис. 6

Масив результатів розрахунків значень \bar{K} для різних значень B і H біля тріщини був оброблений з використанням методу лінійної інтерполяції таким способом, що в результаті були отримані масиви координат точок, прикладення сил в яких призводить до рівних значень КІН. Лінії, що з'єднують точки, прикладення сил в яких призведе до рівних значень \bar{K} , показані на рис. 4, 5 і 6 для аналогічних випадків спрямування більшої твердості ортотропної пластини до напрямку тріщини (рис. 5, 6) і для ізотропної пластини (рис. 4). Дані лінії запропоновано називати "ізокінами".

Отримані результати свідчать, що анізотропія матеріалу впливає на значення КІН і на напружено-деформований стан біля кінця тріщини під дією локальних навантажень. Значення КІН для тріщини розташованої перпендикулярно напрямку більшої твердості пластини із сильно анізотропного матеріалу більш ніж у два рази може перевищувати значення КІН у пластині з тріщиною, спрямованою уздовж напрямку більшої твердості даного матеріалу при дії однакових локальних навантажень у вузькій перпендикулярній лінії тріщини смугі біля її кінця в діапазоні 0,9–1,0 її відносної довжини. Значення КІН для ізотропного матеріалу беруть таким, що приблизно дорівнює проміжним значенням.

У зазначеному діапазоні прикладення сил дає максимальний ефект дії на тріщину, істотно відрізняючись по висоті для різних випадків анізотропії.

Координати точок прикладення сил, які дають максимальний ефект дії на тріщину для випадку ізотропного матеріалу і для випадку розташування тріщини уздовж напрямку більшої твердості матеріалу, розташовані дуже близько і значно відрізняються від аналогічних координат для випадку тріщини поперек напрямку більшої твердості анізотропного матеріалу, лінія розташування яких спрямована майже вертикально від кінця тріщини.

Список літератури

1. Гришин В.И., Бегеев Т.К. Коэффициенты интенсивности напряжений в пластине с центральной поперечной трещиной, усиленной накладками из композитного материала // Механика композиционных материалов. – 1986. – № 4. – С. 696–700.
2. Шкараев С.В. Напряжение около трещины у края подкрепленной пластины // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – Т. 21. – № 6. – С. 93–94.
3. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 360 с.
4. Фильштинский Л.А., Хворост В.Ф. Оптимальное управление коэффициентами интенсивности напряжений в телах с трещинами // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1986. – № 11. – С. 39–42.
5. Бородачев Н.М., Шевченко О.А. Определение коэффициента интенсивности напряжений для трещины в ортотропном теле при действии объемных сил // Прикл. механика. – 1987. – Т. 23. – № 9. – С. 78–84.

6. Borodachev N.M., Kazarinov Yu.I. Shevchenko O.A. Limiting state of construction elements with different kind of damages // *Advancas in fructure resistens in materials*. – New Delhi: Tata Mc Graw-Hill Publishing Co. Ltd. – 1996. – V.1. – P. 43–51.

7. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 832 с.

Стаття надійшла до редакції 24.04.01.

УДК 621.7.9

ББК 624.4

В.В. Шевеля, В.І. Дворук, О.В. Радченко

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ МЕТАЛІВ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Розглянуто установку і методику визначення міцності з'єднання металопокриттів з основним металом. Запропоновано новий матеріал і конструкцію робочого інструмента для обробки деталей вигладжуванням. Показано доцільність застосування вигладжування замість полірування для підготовки поверхні під покриття.

У процесі експлуатації різних машин, механізмів і обладнання їх деталі взаємодіють з навколишнім середовищем – твердим, рідким або газовим. Результатом цієї взаємодії може бути значний знос, що призводить до зниження працездатності деталей, аж до втрати ними свого функціонального призначення.

Одним із найбільш ефективних конструктивно-технологічних напрямків підвищення зносостійкості є нанесення гальванічних і хімічних металопокриттів на поверхню деталей. Невід'ємною і суттєвою операцією всього технологічного процесу нанесення таких покриттів є підготовка поверхні деталі під покриття. Основна вимога високої якості покриття – міцність його з'єднання з основним металом – може бути задоволена за умов, сприятливих для утворення на основному металі великої кількості центрів кристалізації [1].

Необхідні умови забезпечуються в тому випадку, якщо поверхня основного металу має мінімальну шорсткість з однорідним розподілом нерівностей по розмірах, формі і розташуванню, а також вільна від сторонніх забруднень [2]. Для цього в технологічному процесі передбачене виконання полірувально-довідних операцій перед нанесенням покриття [3]. У процесі їх проведення поверхня забруднюється елементами довідних паст (абразивні, жирові продукти), наявність яких виявляється після доводки і ретельного промивання в мікропорах металу і западинах мікрорельєфу поверхонь. Це призводить до зниження міцності з'єднання з основою і поганої якості покриття. Тому є необхідність у пошуках технологічних шляхів, які дозволять уникнути зазначеного недоліку. Результати спеціального дослідження [2] показують, що одним із найбільш перспективних шляхів є обробка поверхні пластичним деформуванням перед нанесенням покриття замість абразивної доводки. Наприклад, заміна операції абразивної доводки алмазним вигладжуванням при підготовці латунного поршня під покриття хімічним нікелем дозволила підвищити міцність з'єднання покриття з основою на 21...31% при повній відсутності випадків його відшаровування і знизити шорсткість поверхні.

За основну характеристику якості електроосаджених і хімічних покриттів (хромування, насталування і хімічного нікелювання) взята міцність їх з'єднання з основою. Визначення цієї характеристики для тонких покриттів (товщиною до 50 мк) пов'язано з методичними труднощами [4]. У зв'язку з відсутністю надійних методик її оцінки і недоліками відомих нами створена спеціальна установка (рис. 1, а), яка складається зі станини, вузла кріплення і вузла навантаження зразка.