

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ

На правах рукопису

ДЕГТЯРЬОВА ОЛЬГА СТАНІСЛАВІВНА

УДК 539.3

РУЙНУВАННЯ ПРУЖНОПЛАСТИЧНИХ ТА В'ЯЗКО-
ПРУЖНОПЛАСТИЧНИХ ОРТОТРОПНИХ ТІЛ З
ТРІЩИНАМИ ПРИ ДВОВІСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

(01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла)

O. Dzh...

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993

Робота виконана в Інституті механіки АН України

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,
професор Камінський А.О.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук Чернишенко І.С.
- кандидат фізико-математичних наук
Кних В.І.

Провідна організація - Фізико-механічний інститут АН України
ім. Г.В.Карпенка

Захист відбудеться 28 вересня 1993 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої ради К 016.49.01 Інституту механіки АН України за адресою: 252057, Київ, вул.Нестерова,3.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту механіки АН України.

Автореферат розісланий " 23 " серпня 1993 р.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00815371 (P)

Вчений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук

Назаренко

В.М.Назаренко

478 27.9.58 3

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний рівень розвитку техніки вимагає від науки дослідження нових задач, які пов'язані з необхідністю підвищення надійності і довговічності машин та конструкцій, що працюють в складних умовах експлуатації. Наявність в матеріалах тріщин та тріщиновидних дефектів, які можуть стати причиною непередбаченого катастрофічного руйнування конструкції, зумовлює підвищений інтерес вчених до механіки руйнування, що є однією з найважливіших складових частин науки про міцність матеріалів і елементів конструкцій, про що свідчить зростаюча кількість робіт, присвячених дослідженню різноманітних аспектів руйнування.

Основи лінійної механіки руйнування були закладені в роботах Гриффітса, Ірвіна, Орована, присвячених дослідженню розвитку тріщин в пружних та квазіпружних тілах. В подальшому значний внесок в становлення механіки руйнування як науки та її розвиток до сучасного рівня зробили В.М.Александров, А.Є.Андрейків, Г.І.Баренблатт, Л.Т.Вережницький, В.В.Волотін, Н.М.Бородачов, П.М.Витвицький, О.М.Гузь, А.О.Камінський, Г.С.Кіт, В.В.Костров, А.Я.Красовський, М.Я.Леонов, В.М.Назаренко, Є.М.Морозов, Н.Ф.Морозов, Л.В.Нікілія, В.В.Новожилов, В.В.Панасик, В.З.Партон, Д.М.Работнов, М.П.Саврук, Р.Л.Салганик, Л.І.Слепян, В.П.Тамуж, А.Т.Улітко, Г.П.Черепанов, С.Я.Ярема, D.S.Dugdale, F.Erdogan, M.Kurashige, H.Liebowitz, J.R.Rice, G.C.Sih, I.N.Sneddon, T.Yokobogu, A.R.Zak та інші.

Все ж, незважаючи на суттєві досягнення в механіці руйнування, при дослідженні розвитку тріщин в реальних конструкціях виявляються класи задач, які не можуть бути розв'язані за допомогою класичних підходів. Однією з таких проблем є дослідження впливу двовісності навантаження на процес руйнування, оскільки коефіцієнти інтенсивності напружень, розкриття в вершині тріщини та J -інтеграл, визначені на основі класичної механіки руйнування, не залежать від складової зовнішнього навантаження, яка діє вздовж площини розташування тріщини. Неузгодженість цього результату з експериментальними та отриманими за допомогою методу скінченних елементів даними зумовила зростання в останній час інтересу до задач руйнування тіл з тріщинами в двохосовому полі напружень. Було розроблено різні під-

ходи, які дозволяють враховувати вплив складової зовнішнього навантаження, паралельної тріщині, на граничний стан.

О.М.Гузем було розроблено теорію крихкого руйнування тіл з початковими напруженнями, що діють вздовж лінії розташування тріщин, при умові, що початкові напруження за величиною значно вищі додатково прикладеної системи зовнішніх сил.

Задачі про руйнування при стисканні вздовж тріщин в тривимірній лінеаризованій постановці було досліджено О.М.Гузем, В.М.Назаренком та іншими з використанням критерію локальної втрати стійкості матеріалу біля тріщин.

Задачі про квазікрихке руйнування в двовісному полі напружен розглядали Liebowitz, Eftis, Jones на основі врахування регулярного члену в асимптотичних формулах для полів напружень та деформацій поблизу вершини тріщини.

Для дослідження руйнування пружнопластичних ізотропних тіл з тріщинами в умовах двовісного навантаження Г.В.Галатенко запропонував модель тріщини з тонкою пластичною зоною, яка враховує вид поверхні текучості матеріалу і наявність компоненти зовнішнього навантаження, що діє вздовж лінії розташування тріщини.

Окрім задач, що стосуються врахування впливу двовісності навантаження на процес руйнування, в останній час акціє інтерес до вивчення руйнування анізотропних тіл з тріщинами, що зумовлено все більш активним використанням композитних матеріалів, які в більшості випадків є анізотропними. Задачі механіки руйнування для різних випадків анізотропії розглядалися Г.І.Варенблаттом, Л.Т.Бережницьким, А.О.Камінським, С.В.Серенсенном, Г.П.Чрепановим та іншими.

Таким чином, до теперішнього часу залишаються недослідженими задачі руйнування анізотропних тіл, ослаблених тріщинами, в двохосьовому полі навантаження, що робить актуальною тему цієї роботи.

Метою роботи є вивчення процесу руйнування ортотропних пружнопластичних і в'язкопружнопластичних тонких пластинок з тріщинами в умовах двовісного навантаження, включаючи:

1. Розробку моделі тріщини в ортотропному пружнопластичному та в'язкопружнопластичному матеріалах, яка враховує вигляд поверхні текучості матеріалу.
2. Розв'язок нових задач механіки руйнування ортотропних

пружнопластичних та в'язкопружнопластичних пластинок з тріщинами при статичному двохосьовому навантаженні.

3. Дослідження впливу на граничний стан і довговічність ортотропних пластин з тріщинами двовісності навантаження, ортотропії пластичних та в'язкопружних властивостей матеріалу.

Наукова новизна. В роботі вперше досліджено задачі механіки руйнування ортотропної пластини з тріщиною в умовах двохосьового навантаження. На основі запропонованої моделі тріщини з тонкою пластичною зоною, що враховує вигляд поверхні текучості даного матеріалу, виконано постановку крайової задачі для пластини з тріщиною, що знаходиться під дією двовісного навантаження на нескінченності і отримано аналітичні вирази для комплексних потенціалів. Визначено параметри моделі тріщини: напруження в пластичній області, її розмір і розкриття в вершині тріщини. Досліджено вплив ортотропії і двовісності навантаження на граничний стан і область квазікрихкого руйнування. Розв'язана задача механіки руйнування для в'язкопружної ортотропної пластини з тріщиною в умовах тривалого двовісного навантаження та показано вплив ступеню двовісності навантаження на тривалість трьох періодів докритичного росту тріщини.

Достовірність результатів забезпечується:

- математичною коректністю постановки задач;
- отриманням розв'язків строгими аналітичними методами;
- точністю обчислень, яка контролюється;
- узгодженістю результатів між собою, їх відповідністю фізичним міркуванням і збіганням, в частинних випадках, з відомими;
- порівнянням з експериментальними даними.

Практична цінність роботи полягає: в створенні моделі тріщини, яка дозволяє визначати граничний стан і довговічність ортотропних пластин з тріщинами в умовах двовісного навантаження; визначенні областей квазікрихкого руйнування і безпечного навантаження; отриманні аналітичних виразів для визначення руйнівного навантаження; оцінці впливу ступеню ортотропії та двовісності навантаження на граничний стан і довговічність пластин з тріщиною.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на семінарах від-

ділу механіки руйнування матеріалів Інституту механіки АН України (1989–1993 р.р.), VII Всесоюзній конференції по механіці полімерних і композитних матеріалів (м.Рига, 1990 р.), III Всесоюзному симпозиумі по механіці руйнування (м.Житомир, 1990 р.). XIV, XVII конференціях молодих вчених Інституту механіки АН України (Київ, 1989, 1992 р.р.).

П у б л і к а ц і ї . Основні результати роботи відображені в [1–6].

Об'єм роботи. Дисертаційна робота викладена на 106 сторінках, включаючи 16 графіків і 4 таблиці. Бібліографічний список нараховує 117 найменувань робіт.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох глав, закінчення і списку літератури.

У вступі дається короткий огляд літератури, приводиться аналіз сучасного стану механіки руйнування матеріалів при дво-вісному навантаженні, обгрунтовано актуальність проблем, які розглядаються в дисертації, визначено мету роботи. Коротко викладено зміст роботи по главах.

В першій главі розглянуто деякі теорії граничних станів анізотропних матеріалів і теорії міцності тіл, ослаблених тріщинами. Викладено основні положення механіки крихкого руйнування, основанийі на понятті коефіцієнту інтенсивності напружень, стосовно анізотропних тіл. Розглянуто застосування σ_0 - моделі руйнування у випадку ортотропного матеріалу. Приведено методику розв'язку задач механіки руйнування анізотропних тіл з тріщинами.

В другій главі розроблено модель тріщини в тонкій пластичній зоні в ортотропному пружнопластичному матеріалі, яка враховує вигляд поверхні текучості даного матеріалу. При побудові моделі тріщини будемо ґрунтуватися на таких припущеннях:

1. траєкторія розвитку тріщини під дією зовнішнього навантаження є прямолінійною;
2. пластична зона, яка виникає поблизу вершини тріщини, моделюється пластичним відрізком на продовженні тріщини, на якому

виконуватся умова текучості даного матеріалу;

3. невідомі компоненти тензору напружень на пластичному відрізьку, крім умови текучості, задовільняють умові неперервності на границі пружної та пластичної областей;

4. компоненти тензору напружень мають скінченні значення у всій області;

5. залежність між компонентами тензорів напружень і деформацій описується узагальненим законом Гука всюди, крім області пластичної деформації.

Виходячи з цих припущень, розглядається нескінченна пластина із ідеального пружнопластичного ортотропного матеріалу, який задовільняє умові текучості загального виду

$$F(\sigma_1, \sigma_2, O_t) = 0 \quad (1)$$

(σ_1, σ_2 - головні напруження, O_t - постійні матеріалу, які визначаються експериментально), яка містить в собі тріщину довжиною $2L$, розташовану вздовж осі ортотропії Ox і вільну від зовнішніх навантажень. На нескінченності діють рівномірно розподілені розтягуючі зусилля інтенсивності p . Пластичний відрізок замінюється додатковим розрізом на продовженні тріщини, на берегах якого діють нормальні самоврівноважені стискаючі напруження σ_y^0 , які необхідно визначити під час розв'язку задачі. Таким чином, отримуємо криву задачу при таких граничних умовах:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \begin{cases} 0, & |x| < L, \\ \sigma_y^0, & L \leq |x| \leq L, \end{cases} y=0; \\ \tau_{xy} &= 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad y=0; \\ F(\sigma_1, \sigma_2, O_t) &= 0, \quad L \leq |x| \leq L, \quad y=0; \\ v &= 0, \quad |x| \geq L, \quad y=0; \\ \sigma_x &= 0, \quad \sigma_y = p, \quad \tau_{xy} = 0, \quad |x| + |y| \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

Звівши поставлену задачу до чотирьох задач спряження для комплексних потенціалів $\omega_1(z_1)$ і $\omega_2(z_2)$ ($z_k = x + i y_k$, y_k - корені характеристичного рівняння $a_{11}s^4 + (2a_{12} + a_{66})s^2 + a_{22} = 0$), за допомогою яких визначається напружено-деформований стан анізотропного середовища, і розв'язувачи їх з використанням

властивостей інтегралів типу Коші і формул Племеля, знаходимо вирази для комплексних потенціалів

$$\omega_k(z_k) = \frac{(-1)^k}{\beta_1 - \beta_2} \left\{ t \frac{\beta_j \sigma_y^0 z_k}{\pi \sqrt{L^2 - z_k^2}} \operatorname{arccos} \frac{l}{L} - t \frac{\beta_j p z_k}{2 \sqrt{L^2 - z_k^2}} + \right. \\ \left. + \frac{\beta_j \sigma_y^0}{2\pi t} \left[\Gamma(L, l, z_k) + i\pi \frac{l+z_k}{l-z_k} \right] - |M_2| \right\}, \quad k=1,2, \quad j=2,1, \quad (3)$$

де $\Gamma(L, l, z) = \ln \frac{L^2 - l + \sqrt{L^2 - l^2} \sqrt{L^2 - z^2}}{L^2 + z l + \sqrt{L^2 - l^2} \sqrt{L^2 - z^2}}, \quad M_2 = \frac{t \beta_1 \beta_2 p}{2(\beta_1 + \beta_2)},$
 $\beta_k = \operatorname{Re} a_k.$

Необхідною умовою обмеженості напружень є умова

$$\frac{l}{L} = \frac{l}{l+d} = \cos \frac{\pi p}{2\sigma_y^0}, \quad (4)$$

яка дозволяє визначити довжину пластичної зони d через довжину тріщини l і навантаження p .

Скориставшись умовою неперервності напружень на границі розділу пружної і пластичної областей і представленням напружень через комплексні потенціали, знаходимо співвідношення, що зв'язує напруження в пластичній зоні σ_x^0 і σ_y^0 :

$$\sigma_x^0 = \beta(\sigma_y^0 - p), \quad (5)$$

де $\beta = \beta_1, \beta_2 = \sqrt{E_1/E_2}$, доповнивши яке умовою текучості (1), отримуємо замкнуту систему двох рівнянь для визначення σ_x^0 і σ_y^0 .

Використовуючи представлення переміщень через комплексні потенціали, знаходимо зміщення берегів розрізу на ділянці $[l, L]$:

$$v(x) = \frac{\sigma_y^0 \sigma_{T0}}{\pi} \left\{ x \Gamma(L, l, x) + x l \ln \frac{x+l}{x-l} - 2l \ln \frac{\sqrt{L^2 - x^2} + \sqrt{L^2 - l^2}}{\sqrt{x^2 - l^2}} \right\} \quad (6)$$

і розкриття в вершині тріщини

$$\delta(l) = \frac{4 T_0 \sigma_y^0 l}{\pi} \ln \cos \frac{\pi p}{2\sigma_y^0}, \quad (7)$$

де

$$\frac{1}{\sqrt{E_1 E_2}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{1/2} \nu_{12} \right] + \frac{E_1}{G_{12}} \right\}^{1/2} = T_0 .$$

У випадку ізотропного матеріалу, який задовільняє умови текучості Треска ($E_1 = E_2 = E$, $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$, $G_{12} = G$), співвідношення (4), (6) дають відомі співвідношення моделі Леонова-Панаска-Дагдейла.

В роботі на прикладі умови текучості Мізеса-Хілла розглянуто вплив ортотропії на напруження в пластичній зоні і показано, що умова $\sigma_x^0 < \sigma_y^0$, яка, згідно з гіпотезою "узагальненого нормального відриву", є необхідною для прямолінійного просування тріщини, для довільного навантаження виконується при $E_1 / E_2 < 1$.

Розглянуто випадок, коли довжина пластичної зони є малою порівняно з довжиною тріщини ($d \ll l$) і отримано вирази довжини зони пластичності і розкриття в вершині тріщини через коефіцієнт інтенсивності напруження K_I :

$$d = \frac{\pi^2 p^2 l}{8(\sigma_y^0)^2} = \frac{\pi \cdot K_I^2}{8(\sigma_y^0)^2}, \quad \delta(l) = \frac{\pi T_0 p^2 l}{2 \sigma_y^0} = \frac{T_0 K_I^2}{2 \sigma_y^0}. \quad (8)$$

В третій главі на підставі запропонованої моделі тріщини та σ_c - і J_c -критеріїв руйнування досліджено граничний стан тонкої ортотропної пластини з тріщиною в умовах двовісного навантаження. З цієї метою розв'язана краєва задача для площини з тріщиною, коли на нескінченності діють нормальні навантаження $\sigma_x^\infty = q$, $\sigma_y^\infty = p > 0$. Показано, що довжина кінцевої зони переміщення берегів розрізу на ділянці $[l, L]$ і розкриття у вершині тріщини визначаються співвідношеннями (4), (6), (7) за умови, що напруження σ_x^0 , σ_y^0 визначаються в результаті розв'язку системи рівнянь

$$\sigma_x^0 = \beta_1 \beta_2 (\sigma_y^0 - p) + q; \quad F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_t) = 0. \quad (9)$$

В роботі наведено вирази для напружень σ_x^0 , σ_y^0 для випадку умов текучості Мізеса-Хілла і Гольденבלата-Копшов.

Якщо за критерій руйнування прийняти критерій критичного розкриття тріщини, то на підставі (7) поле граничних навантажень (p_*, q_*) визначається співвідношенням

$$\frac{4 T_0 \sigma_y^0(p_*, q_*) l}{\pi} \ln \sec \frac{\pi p_*}{2 \sigma_y^0(p_*, q_*)} = \zeta_0. \quad (10)$$

Приймаючи, що постійна δ_0 не залежить від виду напруженого стану, отримуємо, що (10) виконується і при $q=0$, тобто задання довжини тріщини еквівалентно заданню граничного навантаження при одновісному розтягу $p_*^{(0)}$, і граничне навантаження p_* , ζ_0 можливо визначити у вигляді

$$\begin{aligned} \sigma_y^0(p_*, q_*) \ln \sec \frac{\pi p_*}{2 \sigma_y^0(p_*, q_*)} &= \\ &= \sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0) \ln \sec \frac{\pi p_*^{(0)}}{2 \sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0)}. \end{aligned} \quad (10.a)$$

На рис.1 показані крива текучості (1) і граничні криві для матеріалу, який задовільняє умові текучості Мізеса-Хілла при $\sigma_{Tx} / \sigma_{Ty} = 0.8$, для різних значень $p_*^{(0)} / \sigma_{Ty} = 0.1$ (2); 0.5 (3); 0.9 (4). Суцільні лінії відповідають випадку $\beta = 0.3$, пунктирні - $\beta = 0.9$. В роботі приведено також граничні криві для матеріалу з умовою текучості Мізеса-Хілла при $\sigma_{Tx} / \sigma_{Ty} = 1.5$ і для матеріалу з умовою текучості Гольденблота-Колінова.

Якщо за критерій руйнування прийняти критичне значення J -інтеграла, то, враховуючи вираз для J -інтеграла в задачі, що розглядається,

$$J = \int_0^{\delta} \sigma_y d\delta = \sigma_y^0 \delta(l) = m \sigma_{Ty} \delta(l), \quad (11)$$

поле граничних навантажень визначається у вигляді

$$\frac{4 T_0 [\sigma_y^0(p_*, q_*)]^2 l}{\pi} \ln \sec \frac{\pi p_*}{2 \sigma_y^0(p_*, q_*)} = J_0, \quad (12)$$

або (через граничне навантаження при одновісному розтягу $p_*^{(0)}$):

$$[\sigma_y^0(p_*, q_*)]^2 \ln \sec \frac{\pi p_*}{2 \sigma_y^0(p_*, q_*)} =$$

$$= (\sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0))^2 \ln \sec \frac{\pi p_*^{(0)}}{2 \sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0)}. \quad (12.a)$$

На рис.2 для матеріалу, який задовільняє умові текучості Мізеса-Хілла при $\sigma_{Tx} / \sigma_{Ty} = 0.8$, для $\beta = 0.3$ і різних значень $p_*^{(0)} / \sigma_{Ty} = 0.1$ (2); 0.5 (3); 0.9 (4) показані крива текучості (1) і криві граничного навантаження, визначені на підставі J_0 -критерію. Для порівняння пунктиром наведено криві, визначені відповідно до δ_z -критерію.

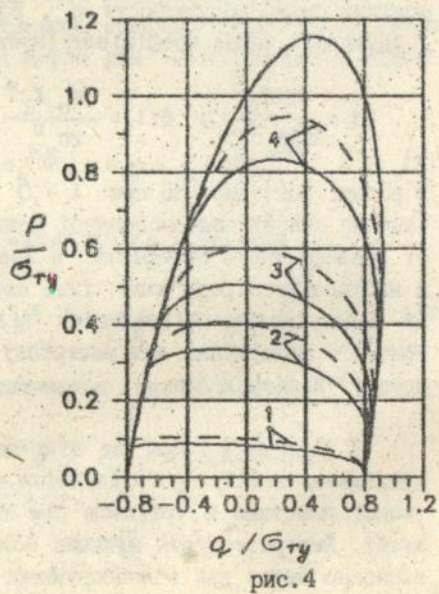
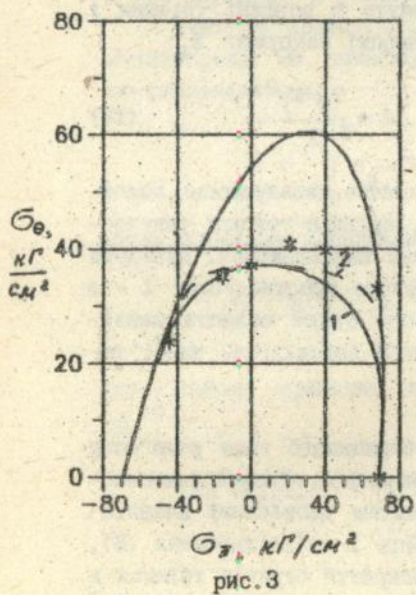
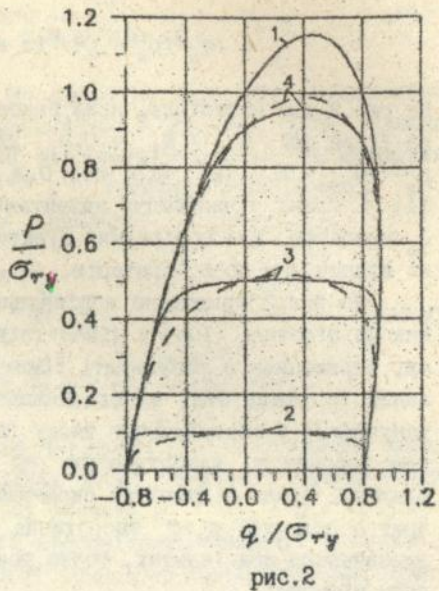
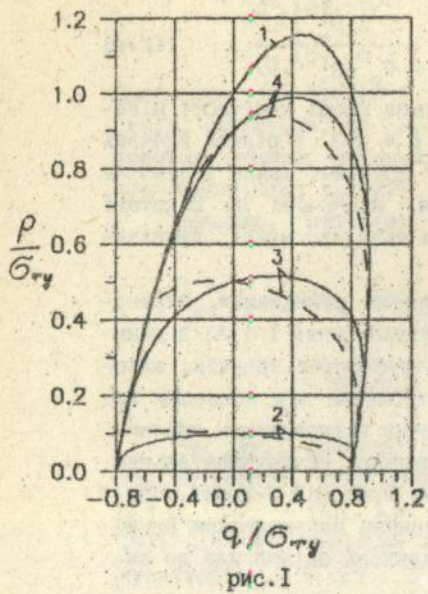
На рис.3 приведено порівняння кривих руйнування, отриманих на підставі (10a) і (12a) (відповідно криві 1 і 2) з даними, отриманими в результаті іспитів трубчастих зразків, виконаних із сталі Ст3, з поздовжньою тріщиною при осьовому навантаженні і внутрішньому тиску (зірочки відповідають значенням граничного навантаження, що отримані експериментальним шляхом). Краще відповідає експерименту критерій $J = const$, причому в області $\sigma_z > 0$ теоретичне граничне навантаження нижче визначеного при іспитах, тобто розрахункова оцінка йде до запасу міцності.

У випадку малих пластичних зон ($d \ll l$) отримані вирази довжини зони пластичності d , розкриття в вершині тріщини і J -інтегралу через коефіцієнт інтенсивності напружень K_I :

$$d = \frac{\pi K_I^2}{8(\sigma_y^0)^2}; \quad \delta(l) = \frac{T_0 K_I^2}{2\sigma_y^0}; \quad J = \frac{T_0 K_I^2}{2}. \quad (13)$$

В роботі показано, що при $l \rightarrow 0$ граничне навантаження, визначене на основі запропонованої моделі, дорівнює границі текучості бездефектного матеріалу, а граничне навантаження, знайдене з наближеного розв'язку (13), необмежено зростає. При $l \rightarrow \infty$ ці навантаження співпадають. Визначено також область квазікрихкого руйнування для матеріалу, який задовільняє умові текучості Мізеса-Хілла.

В четвертій главі на підставі отриманого вище розв'язку досліджено задачу про руйнування ортотропної в'язкопружнопластичної пластини з тріщиною при тривалому двовісному навантаженні. Використовуючи принцип Вольтерра і співвідношення (6), записано вираз для в'язкопружного розкриття берегів тріщини в матеріалі, який проявляє в'язкопружні властивості лише при



зсуві. Для розшифровки функції від інтегральних операторів застосовується метод ланцюгових дробів. Ядра інтегральних операторів приймаються у вигляді дробово-експоненційної функції Ю.М.Работнова.

Оскільки згадана функція Ю.М.Работнова описує обмежену повзучість, то існує сукупність безпечних навантажень, яке визначається співвідношенням

$$\begin{aligned} \sigma_y^0(p_B, q_B) \ln \cos \frac{\pi p_B}{2\sigma_y^0(p_B, q_B)} = \\ = \frac{T_0}{T_\infty} \sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0) \ln \cos \frac{\pi p_*^{(0)}}{2\sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0)}, \end{aligned} \quad (14)$$

де $T_\infty = T^* \cdot t$ - тривале значення оператора T^* , яке для даної задачі має вигляд:

$$T_\infty = \frac{1}{\sqrt{E_1 E_2}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{1/2} - \nu_{12} \right] + \frac{E_1}{G_{12}} \left(1 + \frac{\lambda}{|\gamma|} \right) \right\}^{1/2}.$$

На рис.4 наведено криві безпечного навантаження для матеріалу, що задовільняє умові текучості Мізеса-Хілла при $\sigma_{Tx} / \sigma_{Ty} = 0.8$ і має такі характеристики:

$$\begin{aligned} E_1 = 1.553 \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad E_2 = 2.315 \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad G_{12}^0 = 0.3086 \cdot 10^9 \text{ Па}, \\ \nu_{12} = 0.08, \quad \sigma_{Tx} / \sigma_{Ty} = 0.8, \quad \alpha = 0.85, \quad \lambda = 0.275 \text{ с}^{1-\alpha}, \quad \gamma = -0.181 \text{ с}^{1-\alpha}. \end{aligned}$$

Криві 1, 2, 3, 4 відповідають значенням $p_*^{(0)} / \sigma_{Ty} = 0.1; 0.4; 0.6; 0.9$. Пунктиром зображені криві граничного навантаження для відповідних довжин тріщин, отриманих на підставі (10в).

Виходячи з визначаючих рівнянь докритичного розвитку тріщини у в'язкопружному середовищі, які були отримані в роботах А.О.Камінського, знайдено співвідношення для визначення тривалості інкубаційного t_* , перехідного Δt_I та основного Δt_{II} періодів розвитку тріщини відповідно в формі:

$$\begin{aligned} (t_*)^{1-\alpha} \sum_{i=1}^N \sigma_i p_i^2(\alpha, \gamma, t_*^{1-\alpha}) = \\ = \frac{\sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0)}{\sigma_y^0(p, q)} \frac{\ln \cos \frac{\pi p_*^{(0)}}{2\sigma_y^0(p_*^{(0)}, 0)}}{\ln \cos \frac{\pi p}{2\sigma_y^0(p, q)}}; \end{aligned} \quad (15)$$

табл. I

$q/\sigma_{\text{ту}}$	$p/\sigma_{\text{ту}}$	$d/l_0 \cdot 10^{-1}$	инкуб. период t_* , год.	перех. период Δt_I , год.	основний период Δt_{II} , год.
-0.6	0.31 0.32 0.33	1.48 1.65 1.84	$2.82 \cdot 10^5$ $7.22 \cdot 10^1$ $1.90 \cdot 10^{-1}$	$3.59 \cdot 10^1$ $7.44 \cdot 10^{-3}$ 0	$1.52 \cdot 10^1$ $6.37 \cdot 10^{-3}$ 0
-0.4	0.34 0.35 0.37	1.27 1.37 1.58	$2.81 \cdot 10^4$ $8.24 \cdot 10^1$ $1.10 \cdot 10^{-2}$	$3.75 \cdot 10^1$ $8.10 \cdot 10^{-2}$ -	$1.79 \cdot 10^1$ $7.30 \cdot 10^{-2}$ -
-0.2	0.34 0.35 0.37	1.17 1.25 1.42	$1.34 \cdot 10^7$ $3.15 \cdot 10^3$ $4.80 \cdot 10^{-1}$	$4.23 \cdot 10^3$ $7.24 \cdot 10^0$ $1.72 \cdot 10^{-5}$	$5.87 \cdot 10^4$ $4.80 \cdot 10^0$ $1.90 \cdot 10^{-5}$
0.0	0.33 0.35 0.37	1.18 1.33 1.49	$3.00 \cdot 10^{13}$ $2.42 \cdot 10^1$ $8.40 \cdot 10^{-2}$	$1.77 \cdot 10^5$ $3.50 \cdot 10^{-1}$ $1.22 \cdot 10^{-8}$	$1.74 \cdot 10^5$ $2.98 \cdot 10^{-1}$ $1.37 \cdot 10^{-8}$
0.2	0.32 0.33 0.35	1.33 1.42 1.58	$8.32 \cdot 10^6$ $2.79 \cdot 10^3$ $5.20 \cdot 10^{-1}$	$7.26 \cdot 10^2$ $1.96 \cdot 10^0$ $1.58 \cdot 10^{-6}$	$6.92 \cdot 10^1$ $1.37 \cdot 10^0$ $1.64 \cdot 10^{-6}$
0.4	0.29 0.31 0.33	1.55 1.74 1.95	$1.13 \cdot 10^{11}$ $1.03 \cdot 10^2$ $2.80 \cdot 10^{-2}$	$1.38 \cdot 10^3$ $5.39 \cdot 10^{-3}$ -	$1.51 \cdot 10^3$ $4.45 \cdot 10^{-3}$ -
0.6	0.25 0.27 0.29	2.21 2.48 2.77	$1.17 \cdot 10^7$ $9.22 \cdot 10^0$ $1.05 \cdot 10^{-3}$	$1.17 \cdot 10^0$ 0 -	$5.88 \cdot 10^0$ 0 -

$$1 + k(\alpha)(\Delta t_I)^{1-\alpha} \sum_{t=1}^N \sigma_t P_2(\alpha, \gamma_t (\Delta t_I)^{1-\alpha}) =$$

$$= \frac{\sigma_y^0(p^*(0), 0)}{\sigma_y^0(p, q)} \cos \frac{\pi p}{2\sigma_y^0(p, q)} \frac{\ln \cos \frac{\pi p^*(0)}{2\sigma_y^0(p^*(0), 0)}}{\ln \cos \frac{\pi p}{2\sigma_y^0(p, q)}}; \quad (16)$$

$$\Delta t_{II} = t_{II} - t_I = - \int_0^{y_0} \frac{xQ(x) + x^2Q'(x)}{1 + xQ(x)} dx; \quad (17)$$

де y_0 знаходиться з розв'язку рівняння

$$l_*/l_0 = (1+x)(1+y_0Q(y_0)), \quad x = d/l_0 = \text{всг} (\pi p / 2\sigma_y^0) - 1.$$

в вид функцій $k(\alpha)$, $P_2(\alpha, x)$, $Q(y)$ наведено в дисертації.

табл.2

$q/\sigma_{\text{ту}}$	$p/\sigma_{\text{ту}}$	$d/l_0,$ 10^{-3}	інкуб. період t_* , год.	перех. період Δt_I , год.	основний період Δt_{II} , год.
-0.6	0.092	8.46	$2.69 \cdot 10^1$	$7.37 \cdot 10^2$	$1.02 \cdot 10^4$
	0.093	8.65	$5.65 \cdot 10^0$	$8.78 \cdot 10^1$	$4.27 \cdot 10^2$
	0.097	9.44	$1.30 \cdot 10^{-2}$	$6.00 \cdot 10^{-2}$	$4.30 \cdot 10^{-1}$
	0.100	10.01	$4.70 \cdot 10^{-5}$	$8.00 \cdot 10^{-5}$	$9.20 \cdot 10^{-4}$
-0.4	0.092	7.88	$4.01 \cdot 10^2$	$5.27 \cdot 10^4$	$3.49 \cdot 10^5$
	0.093	8.06	$7.29 \cdot 10^1$	$3.28 \cdot 10^3$	$6.10 \cdot 10^4$
	0.097	8.77	$1.10 \cdot 10^{-1}$	$1.34 \cdot 10^0$	$7.04 \cdot 10^0$
	0.100	9.32	$1.88 \cdot 10^{-3}$	$6.10 \cdot 10^{-3}$	$6.00 \cdot 10^{-2}$
-0.2	0.092	8.34	$3.80 \cdot 10^1$	$1.22 \cdot 10^3$	$2.06 \cdot 10^5$
	0.093	8.56	$8.19 \cdot 10^0$	$1.44 \cdot 10^2$	$5.76 \cdot 10^2$
	0.097	9.30	$2.30 \cdot 10^{-2}$	$1.10 \cdot 10^{-1}$	$7.96 \cdot 10^{-1}$
	0.100	9.87	$1.30 \cdot 10^{-4}$	$2.59 \cdot 10^{-4}$	$3.02 \cdot 10^{-3}$
0.0	0.087	8.85	$3.36 \cdot 10^2$	$3.41 \cdot 10^4$	$2.77 \cdot 10^5$
	0.090	9.45	$2.53 \cdot 10^0$	$2.93 \cdot 10^1$	$1.79 \cdot 10^2$
	0.093	10.01	$2.80 \cdot 10^{-2}$	$1.23 \cdot 10^{-1}$	$8.19 \cdot 10^{-1}$
	0.095	10.50	$9.47 \cdot 10^{-4}$	$2.50 \cdot 10^{-3}$	$2.30 \cdot 10^{-2}$
0.2	0.082	10.49	$4.70 \cdot 10^1$	$1.32 \cdot 10^3$	$1.90 \cdot 10^4$
	0.085	11.23	$3.50 \cdot 10^{-1}$	$2.23 \cdot 10^0$	$8.11 \cdot 10^0$
	0.087	11.74	$1.30 \cdot 10^{-2}$	$4.70 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-1}$
	0.090	12.51	$3.10 \cdot 10^{-5}$	$3.60 \cdot 10^{-5}$	$3.40 \cdot 10^{-4}$
0.4	0.072	13.12	$1.92 \cdot 10^2$	$7.95 \cdot 10^3$	$7.70 \cdot 10^4$
	0.075	14.14	$7.00 \cdot 10^{-1}$	$4.06 \cdot 10^0$	$7.77 \cdot 10^0$
	0.077	14.84	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$5.50 \cdot 10^{-2}$	$2.74 \cdot 10^{-1}$
	0.080	15.92	$2.50 \cdot 10^{-5}$	$1.40 \cdot 10^{-5}$	$1.15 \cdot 10^{-4}$
0.6	0.057	20.80	$2.60 \cdot 10^2$	$5.09 \cdot 10^3$	$3.51 \cdot 10^4$
	0.060	22.73	$2.80 \cdot 10^{-1}$	$6.70 \cdot 10^{-1}$	$1.57 \cdot 10^0$
	0.063	24.71	$2.06 \cdot 10^{-4}$	$7.50 \cdot 10^{-5}$	$3.64 \cdot 10^{-4}$

Тривалість інкубаційного, перехідного і основного періодів докритичного росту тріщини в конкретному матеріалі для випадків малих і достатньо розвинутих кінцевих зон дається відповідно в табл.1 і табл.2.

У закінченні коротко сформульовано основні положення і висновки дисертаційної роботи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

I. Таким чином, в дисертаційній роботі вперше досліджено задачі механіки руйнування ортотропних тіл з тріщиною в умовах двовісного навантаження, включаючи:

1) Розробку моделі тріщини з тонкою пластичною зоною в ортотропному матеріалі, яка враховує вигляд поверхні текучості даного матеріалу.

2) Розв'язок задачі про двовісне статичне навантаження ортотропної пружнопластичної пластинки з тріщиною; аналіз граничного стану на підставі рівних критеріїв руйнування та вплив на нього ступеня ортотропії і двовісності навантаження.

3) Вивчення впливу двовісності навантаження на тривалість трьох періодів докритичного росту тріщини в ортотропній в'язкопружній пластинці.

II. Основні результати є такими:

1) Сформульовано основні положення моделі тріщини з тонкою пластичною зоною в ортотропному пружнопластичному і в'язкопружнопластичному матеріалі, яка враховує вигляд поверхні текучості даного матеріалу.

2) Отримано аналітичні вирази для основних параметрів моделі: напружень в пластичній зоні, її розмірів і розкриття в вершині тріщини.

3) На підставі запропонованої моделі тріщини та σ_0 - і J_0 - критеріїв руйнування аналітично визначено граничний стан ортотропної пластинки з тріщиною при двовісному навантаженні.

4) Отримано числові результати для конкретних умов текучості Мізеса-Хілла та Гольденבלата-Копнова; проведено порівняння розрахункових результатів з даними, які було отримано експериментальним шляхом на трубчастих зразках з повздожньою тріщиною.

5) Досліджено випадок квазікрихкого руйнування ортотропної пластинки з тріщиною в умовах двовісного навантаження; визначено область навантажень, в якій можуть застосовуватись співвідношення лінійної механіки руйнування.

6) Записано рівняння контура тріщини в ортотропній в'язкопружнопластичній пластинці, яка знаходиться під дією постійного в часі двовісного навантаження.

7) Отримано аналітичний вираз поверхні безпечного навантаження.

8) Для матеріалу, в'язкопружні властивості якого описуються інтегральними операторами в ядром Д.М.Работнова, визначено тривалість трьох періодів докритичного розвитку тріщини в умовах двовісного навантаження; проаналізовано їх внесок в загальну довговічність тіла; показано вплив навантаження, що діє вздовж лінії розташування тріщини.

III. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1) Запропонована модель тріщини дозволяє врахувати як вигляд поверхні текучості та ортотропію пружних властивостей конкретного матеріалу, так і наявність складової зовнішнього навантаження, що діє вздовж лінії розташування тріщини.

2) В області квазікрихкого руйнування граничні стани, визначені на основі σ_c - і J_c - критеріїв, практично співпадають і не залежать від двовісності зовнішнього навантаження.

3) Поза області квазікрихкого руйнування складова зовнішнього навантаження, паралельна тріщині, може як підвищувати, так і знижувати граничне навантаження порівняно з одноосним розтягом.

4) Складова зовнішнього навантаження, паралельна тріщині, суттєво впливає на величину безпечного навантаження; цей вплив є аналогічним впливу на граничне навантаження.

5) При тривалій дії зовнішнього навантаження тривалість інкубаційного, перехідного та основного періодів докритичного росту тріщини суттєво залежить від двовісності навантаження.

6) Для розглянутого в'язкопружного матеріалу для тріщин з малими кінцевими зонами основний внесок в загальну довговічність належить основному періоду, а при збільшенні розміру кінцевої зони зростає внесок інкубаційного періоду, причому при наявності достатньо розвинутих зон пластичності швидкий динамічний ріст тріщини може починатися вже під час перехідного періоду.

Основний зміст дисертаційної роботи викладено в публікаціях:

1. Галатенко Г.В., Дегтярева О.О. Обобщение σ_c -модели разрушения на случай ортотропного упругопластического тела с трещиной при двухосном нагружении // Тр. XIV науч. конф. мол. ученых Ин-та мех. АН УССР. Киев, 23 - 26 мая 1989. Ч.1 / АН УССР. Ин-т мех.- Киев, 1989.- С.25-29.- Деп.в ВИНТИ 2.08.89 № 5164-И89.
2. Каминский А.А., Дегтярева О.О., Галатенко Г.В. Разрушение ортотропных упругопластических композитов с трещиной при двухосном нагружении // Тезисы VII Всесоюзной конференции по механике полимерных и композитных материалов, Рига, 17-20 апреля 1990 г. / Рига. Ин-т механики полимеров АН Латв.ССР.- 1990.- С.73.
3. Галатенко Г.В., Дегтярева О.О., Каминский А.А. Упругопластическое разрушение ортотропной пластины с трещиной при двухосном нагружении // Прикл. механика.- 1990.- 26, №.- С.93-99.
4. Галатенко Г.В., Дегтярева О.О. Предельное состояние ортотропных упругопластических тел с трещинами при двухосном нагружении // Тезисы III Всесоюз. симп. по механике разрушения, Житомир, 30 октября-1 ноября 1990 г. Ч.1.- С.15-16.
5. Каминский А.А., Дегтярева О.О., Галатенко Г.В. Разрушение ортотропных упругопластических композитов с трещиной при двухосном нагружении // Механика комп. материалов.- 1991.- №.- С.284-291.
6. Дегтярева О.О. Начальные этапы развития трещины в ортотропной вязкоупругой пластине при двухосном нагружении // Тр. XVII науч. конф. мол. ученых Ин-та мех. АН Украины. Киев, 19-22 мая 1992. Ч.1 / АН Украины. Ин-т мех.- Киев, 1992.- С.58-62.- Деп.в УкрИНТЭИ 7.07.92, № 1021-Ук92.

О. Дегтярева

Подписано к печати 22.06.1993 г. Формат 60x84/16
 Бумага офсетная Усл.-печ. лист, 1,0. Уч.-изд. лист, 1,0.
 Тираж 100. Заказ 708. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
 252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

AB 27.968

AB 27.968