

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

КОЗУБ Юрій Гордійович

УДК 539.3:624.04

**ПРОЦЕСИ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВЛАСТОМЕРІВ
В ТРИВИМІРНІЙ ПОСТАНОВЦІ**

Спеціальність 01.02.04 - Механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1997

039.3



00751743 (R)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі вищої та прикладної математики
Луганського сільськогосподарського інституту

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Киричевський В.В.

Луганський сільськогосподарський інститут
зав. кафедрою вищої та прикладної математики

Науковий консультант - кандидат технічних наук, доцент
Дохняк Б.М.

Луганський сільськогосподарський інститут,
кафедра вищої та прикладної математики

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Сахаров О.С.

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут",
зав. кафедрою хімічного, полімерного та
сілікатного машинобудування

- кандидат технічних наук
Майборода О.Є.

Державний науково-технічний центр ядерної
та радіаційної безпеки, науковий секретар

Провідна організація - Український транспортний університет
кафедра теоретичної та прикладної механіки
та кафедра машинознавства та інженерної
графіки

Захист відбудеться "15" серпня 1997р. о 15⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої ради Д 01.02.18 при Національному технічному
університеті України "Київський політехнічний інститут" за
адресою 252056, м.Київ, просп. Перемоги,37.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці НТУУ "КПІ"

Автореферат розіслано "14" листопада 1997р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

Боронко О.О.

Актуальність проблеми. За останній час значно зросла роль використання в машинобудуванні, авіабудуванні, сільськогосподарському машинобудуванні конструкцій на основі еластомерів. Ущільнювальна арматура, транспортні стрічки, приводні паси, шини, захисні покриття та футеровки, пружні ланки машин, віброізолятори, амортизатори і т.д. - це пристрої, в яких еластомери знайшли широке використання. Застосування еластомерів як силових елементів машин дозволяє підвищити їх продуктивність, зменшити вібрацію, звуковий тиск, матеріаломісткість.

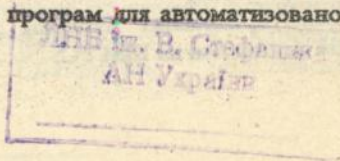
Особливості поведінки еластомерів при різних видах навантаження дозволяють їм зберігати свої технологічні властивості при наявності тріщин, причому тривалість процесу руйнування еластомерного елемента конструкції порівнянна з довговічністю тіла. При проектуванні таких конструкцій необхідно враховувати особливості розвинення технологічних дефектів і тріщин від втоми. Як правило, в реальних умовах експлуатації еластомерні елементи конструкцій знаходяться в складному тривимірному напружено-деформованому стані, при цьому зазнають нелінійних деформацій і виявляють властивості слабостисливого матеріала.

Розв'язання задач механіки руйнування еластомерів в тривимірній постановці практично не розглядалось в силу складності моделювання поведінки конструкцій з тривимірними тріщинами. Окрім того, використання метода скінчених елементів (МСЕ) в формі метода переміщень, оснований на варіаційному принципі Лагранжа, приводить до виродження матриць жорсткості для конструкцій із слабостисливих еластомерів. Навколо вершини тріщини виникає поле великих деформацій. Для СЕ, що лежать в цій області, матриця жорсткості вироджується при значеннях коефіцієнта Пуасона близьких до 0.5. Тому актуальним являється розвинення метода скінчених елементів для розв'язання задач механіки руйнування слабостисливих еластомерів.

Метою роботи є розвиток та використання метода скінчених елементів в дослідженні процесів руйнування еластомерних елементів конструкцій з урахуванням геометричної нелінійності та слабкої стисливості матеріала.

Основні напрямки дослідження:

- розробка математичної моделі процесів нелінійного деформування еластомерних конструкцій з тріщинами на основі моментної схеми скінчених елементів;
- розробка та реалізація алгоритмів чисельного розв'язання задач механіки руйнування еластомерів;
- створення комплексу обчислювальних програм для автоматизованого розв'язання задач руйнування на IBM PC;



дослідження сингулярних полів напружень та деформацій в еластостійких конструкціях з тріщинами та визначення параметрів руйнування.

Наукова новизна. 1. Запропоновано просторовий квадратичний сингулярний СЕ з потрібною апроксимацією переміщень, деформацій та функції змінення об'єму, який дозволяє описувати поведінку еластомера з будь-якою стисливістю навколо фронту тріщини. Для врахування особливості розподілення переміщень в функції форми введені компоненти, пропорційні $r^{1/2}$.

2. Створено пакет прикладних програм "CRACK" для визначення параметрів механіки руйнування слабостисливих еластомерів в тривимірній постановці з застосуванням спеціальних СЕ.

3. Досліджено поля напружень навколо фронту тріщини в геометрично нелінійному слабостисливому матеріалі при сумарній відносній деформації до 45%. Характер розподілення нелінійних напружень і деформацій співпадає з лінійними рішеннями при деформаціях до 40%.

4. Вперше для еластостійких елементів конструкцій з поверхневими тріщинами отримані чисельні розв'язки задач деформування та визначення параметрів руйнування в тривимірній постановці.

Практична цінність. Розроблено скінченноелементний алгоритм розв'язання задач механіки руйнування нелінійних еластомерів з будь-якою стисливістю. Створено ППП автоматизованого обчислення еластостійких елементів конструкцій з урахуванням процесів руйнування. Досліджено поля напружень навколо фронту тріщини в конструкціях із геометрично нелінійних слабостисливих еластостійких матеріалів при навантаженнях, відповідних сумарній деформації до 40%.

Достовірність чисельних результатів підтверджується строгістю математичних виводів, порівнянням з існуючими експериментальними даними, чисельними розв'язками інших авторів та аналітичними розв'язками деяких задач механіки руйнування.

На захист виносяться:

-методика побудовання матриці жорсткості тривимірного квадратичного сингулярного елемента, враховуючого слабку стисливість, особливості розподілення переміщень, деформацій та напружень навколо фронту тріщини;

-алгоритми чисельного розв'язання задач механіки руйнування геометрично нелінійного слабостисливого високоеластичного матеріала методом скінчених елементів;

-пакет прикладних програм для розв'язання задач руйнування в тривимірній постановці на IBM PC;

результати чисельного розв'язка задач деформування і руйнування конструкцій із геометрично нелінійних еластомерів.

Апробація роботи. Основні результати роботи були докладні та обговорені:

- на Міжнародному Конгресі по застосуванню інформатики та математики в архітектурі та будівництві, Веймар, Німеччина, (IKF-97); 1997р.

- на 6-му, 7-му та 8-му Міжнародних Симпозіумах "Проблеми шини и резинокордных композитов", Москва 1995,1996,1997 рр.

- на 1-му та 2-му Міжнародних Симпозіумах "Механика эластомеров" Севастополь 1994, 1997 рр.

- на науково-технічних конференціях Луганського сільськогосподарського інституту 1992-1997 рр.

Публікації. По результатам досліджень, викладених в дисертації, опубліковано 13 робіт.

Об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, заключення, списку літератури (126 найменувань) і додатків та містить 101 сторінку машинописного тексту, 34 малюнка, 15 таблиць.

Зміст роботи

У вступі розглянуто актуальність розвинення методики досліджень еластомерних конструкцій з тріщинами. Зроблено огляд вітчизняної та зарубіжної літератури по методам розв'язання задач механіки руйнування.

Основні дослідження по механіці руйнування опубліковані в роботах А.А.Гриффітса, Е.Орвана, Дж.Р.Ірвіна, О.Е.Андрейківа, О.М.Гузя, В.А.Вайнштока, М.Я.Леонова, В.В.Панасюка, Г.П.Черепанова та ін.

Найбільш широко використовується в механіці руйнування метод скінчених елементів. Значні розробки в розвитку теорії та реалізації МСЕ належать вітчизняним вченим В.А.Баженову, Д.В.Вайнбергу, П.М.Варваку, П.П.Ворошку, О.С.Городецькому, О.І.Гуляру, Г.Г.Зав'ялову, А.Л.Квітці, В.В.Киричевському, В.М.Кислюкому, О.С.Сахарову та зарубіжним Л.О.Розіну, М.М.Шапошникову, О.К.Зенкевичу, Р.Галлагеру, Дж.Одену та ін.

В механіці руйнування МСЕ почав використовуватись пізніше. Розглянуто роботи С.Аглурі, О.І.Гуляра, О.Л.Козака, Т.О.Кушніренко, Є.М.Морозова, Г.П.Никишкова, О.С. Сахарова та інших авторів, в яких обговорені аспекти використання СЕ для обчислення параметрів механіки руйнування стосовно конструкцій із традиційних матеріалів.

Вивченню поведінки полімерів, в тому числі еластомерів присвячені роботи Г.М.Бартенева, Ю.С.Зуєва, А.О.Каміньського, В.Г.Карнахова, І.К.Сенченкова, Б.П.Гуменюка, С.І.Димінкова, Е.Е.Лавендела,

В.М.Потураєва, В.І.Дирди, В.В.Киричевського, Б.М.Дохняка та ін. Слід зазначити, що практично відсутні роботи, присвячені застосуванню МСЕ в механіці руйнування еластомерів, за винятком робіт В.А.Дружиніна і С.А.Гозмана.

Приведений огляд дозволив сформулювати цілі роботи та намітити шляхи їх досягнення.

В першому розділі на основі експериментальних досліджень В.М.Потураєва, В.І.Дирди розглянуті особливості процесів руйнування еластомірних матеріалів. Важливою властивістю еластомерів є значна дисипація енергії, яка протидіє утворенню тріщин та їх зростанню при неперервній швидкості навантаження. При циклічному деформуванні дисипація не справляє істотного позитивного впливу на руйнування еластомерів.

Приведені основні співвідношення теорії пружності еластомерів, що враховують геометричну нелінійність матеріала. Для описання властивостей еластомера використовується узагальнений закон Гука. На основі досліджень К.С. Le, Р.Н. Geubelle, W.G. Knauss прийнято, що в достатньо широкому діапазоні навантажень сингулярність поля деформацій в вершині тріщини має порядок $\gamma^{-1/2}$. Для врахування таких сингулярностей може бути використаний СЕ, в якому поле переміщень має особливість відповідного порядку. В роботі розглянуто спеціальний просторовий квадратичний СЕ середникова сімейства, в якому в функції форми введені компоненти пропорційні $\gamma^{1/2}$. В загальному вигляді функції форми представляються як поліном

$$N_i = (a_0 + a_1 \sqrt{x^2 + 1} + a_2 x^2 + a_3 (x^2)^2) (b_0 + b_1 \sqrt{x^2 + 1} + b_2 x^2 + b_3 (x^2)^2) \times (c_0 + c_1 \sqrt{x^2 + 1} + c_2 x^2 + c_3 (x^2)^2) \quad (1)$$

При побудованні функцій форми для кожного вузла визначаються значення коефіцієнтів a_i, b_j, c_k .

Закон апроксимації переміщень по об'єму СЕ записується у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{u}_k &= \sum_{pqr} \beta_{k, pqr} \left(x^2 + \frac{1 - (-1)^p}{2} \right)^{\frac{p}{2}} \left(x^2 + \frac{1 - (-1)^q}{2} \right)^{\frac{q}{2}} \left(x^3 + \frac{1 - (-1)^r}{2} \right)^{\frac{r}{2}} = \\ &= \sum_{pqr} \beta_{k, pqr} \varphi^{(pqr)} \end{aligned} \quad (2)$$

Розклавши в ряд ірраціональні компоненти отримуємо закон апроксимації

$$\tilde{u}_k = \sum_{lmn} \omega_{k, lmn} \frac{(x^2)^l}{l!} \frac{(x^2)^m}{m!} \frac{(x^3)^n}{n!} = \sum_{lmn} \omega_{k, lmn} \psi^{(lmn)} \quad (3)$$

Коефіцієнти ω_k можна виразити через вузлові переміщення за допомогою матриць [A] и [B], які установлюють зв'язок між функціями форми N_i та степеневими функціями ψ (р. 91)

$$\{\omega_k\} = [B] \{\beta_k\} = [B][A] \{u_k\}. \quad (4)$$

Варіація енергії пружної деформації

$$\delta W = \iiint_V [2\mu g^k g^l \delta \epsilon_{kl} + \lambda \theta g^i] \delta \epsilon_{ij} dv. \quad (5)$$

Компоненти тензора деформації та функції зміновання об'єму, яка відповідає за слабку стисливість, на основі метода, запропонованого В.В.Киричевським, представляємо в вигляді ряду Маклорена

$$\epsilon_{ij} = \sum_{\alpha=0}^{L_p} \sum_{\nu=0}^{N_p} \sum_{\sigma=0}^{M_p} e_{ij}^{(\alpha\nu\sigma)} \psi^{(\alpha\nu\sigma)} = \{e_{ij}\}^T \{\psi_{\omega}\}. \quad (6)$$

$$\theta = \sum_{\mu=0}^1 \sum_{\nu=0}^1 \sum_{\lambda=0}^1 \xi^{(\mu\nu\lambda)} \psi^{(\mu\nu\lambda)} = \{\xi\}^T \{\psi_{\theta}\}. \quad (7)$$

Коефіцієнти розкладення $e_{ij}^{(\alpha\nu\sigma)}$ и $\xi^{(\mu\nu\lambda)}$ обчислюються в відповідності з МССЕ за формулами

$$e_{ij}^{(\mu\nu\lambda)} = \frac{\partial^{(\mu+\nu+\lambda)} \epsilon_{ij}}{(\partial x^1)^\mu (\partial x^2)^\nu (\partial x^3)^\lambda} \Big|_{x^1=x^2=x^3=0}, \quad \{e_{ij}\} = [F_{ij}^{k'}] \{\omega_k\}, \quad (8)$$

$$\xi^{(\mu\nu\lambda)} = \frac{\partial^{(\mu+\nu+\lambda)} \epsilon_{ii}}{(\partial x^1)^\mu (\partial x^2)^\nu (\partial x^3)^\lambda} \Big|_{x^1=x^2=x^3=0}, \quad \{\xi\} = [F_{\theta}^{k'}] \{\omega_k\}. \quad (9)$$

Коефіцієнти матриці жорсткості СЕ обчислюються за формулою

$$[G^{s't'}] = [A]^T [B]^T [F_{ij}^{s'}]{}^T [E^{ijk}] [F_{kl}^{t'}] [B][A] + \\ + [A]^T [B]^T [F_{\theta}^{s'}]{}^T [E^{\theta}] [F_{\theta}^{t'}] [B][A], \quad (10)$$

$$\text{де } [E^{ijk}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 2\mu g^{ik} g^{jl} \{\psi_{(ij)}\} \{\psi_{(kl)}\}^T \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3,$$

$$[E^{\theta}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \lambda \{\psi_{(\theta)}\} \{\psi_{(\theta)}\}^T \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3.$$

Для спеціального СЕ побудовані матриці [A], [B], $[F_{ij}^{k'}]$, $[F_{\theta}^{k'}]$.

Як приклад, що ілюструє достовірність розробленого спеціального СЕ, розв'язано задачі розтягання прямокутної плити з різним розташуванням наскрізної тріщини. Для плит з крайовими тріщинами існують аналітичні розв'язки розкриття тріщини на торцевій поверхні, для плити з центральною

тріщиною такий розв'язок існує для розкриття тріщини в середній частині тріщини. При скінченоеlementній дискретизації конструкції спеціальні СЕ розташовувались навколо фронту тріщини, в решті масива використовувались звичайні квадратичні елементи. Для порівняння також проводилось розв'язання задачі за допомогою метода згущення звичайних лінійних СЕ. Отримано задовільне співпадання результатів чисельних та аналітичних розв'язків. Задовільне рішення з використанням квадратичних елементів отримано при розмірності розрахункової сітки в 1.5 рази меншої ніж при використанні лінійних СЕ.

В другому розділі описано алгоритми розв'язання задач геометрично нелінійного деформування еластомерів та обчислення параметрів механіки руйнування.

Описання поведінки слабостисливого матеріала приймається на основі узагальненого закону Гука

$$\sigma^{\#} = 2\mu \left[g^* g^{\#} \varepsilon_{kl} - \frac{1}{3} J_1(\varepsilon) g^{\#} \right] + B \left(\sqrt{I_3(G^*)} - 1 \right) g^{\#}, \quad (11)$$

де $B = 2/3\mu + \lambda$ - коефіцієнт об'ємного стискування.

Для описання великих деформацій використовується тензор кінцевих деформацій, який можна розкласти на суму лінійних та нелінійних складових

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(C_i^m u_{n,j} + C_j^m u_{n,i} \right) + \frac{1}{2} u_{n,i} u_{n,j} = \varepsilon_{ij}^{(n)} + \varepsilon_{ij}^{(n)}. \quad (12)$$

Для лінеаризації функції об'ємної деформації $\sqrt{I_3}$ розкладається в ряд Тейлора навколо точки $I_3 = 1$. В силу слабкої стисливості обмежимося числами другого порядку.

$$\sqrt{I_3(G^*)} = 1 + \frac{1}{2} (I_3 - 1) - \frac{1}{3} (I_3 - 1)^2. \quad (13)$$

Якщо виразити третій інваріант першої міри деформацій Коши-Гріна через інваріанти тензора кінцевих деформацій, то отримаємо

$$\sigma^{ij} = \sigma^{ij}_{(n)} + \sigma^{ij}_{(n)}$$

Варіація питомої потенційної енергії деформації

$$\delta\Pi = \delta W - \delta A = \int_V (\sigma^{ij}_{(n)} + \sigma^{ij}_{(n)}) \delta(\varepsilon_{ij}^{(n)} + \varepsilon_{ij}^{(n)}) dv - \int_V \rho F^i \delta u_i dv - \int_S Q^i \delta u_i ds = 0. \quad (14)$$

представляє собою систему нелінійних рівнянь відносно компонентів вектора переміщень, яку можна записати у вигляді

$$uK\delta u + uN(u)\delta u - P\delta u = 0, \quad (15)$$

де K -оператор лінійної частини системи розрішюючих рівнянь (глобальна матриця жорсткості), u -вектор вузлових переміщень, $N(u)$ -оператор нелінійних добавок, P -вектор навантажень.

Для розв'язання даної системи рівнянь використовується модифікований метод Ньютона-Канторовича, раніше розроблений В.В.Киричевським, В.М.Кислюком та О.С. Сахаровим і адаптований автором на випадок розв'язання задач руйнування слабостисливих еластомерів з тріщинами. Обчислювальну схему цього метода можна представити у вигляді

$$K^{(i)} \Delta u^{(k)} = -N(u^{(k-1)}) + P^{(i)}, \quad (16)$$

де $K^{(i)}$ - лінеаризована матриця жорсткості конструкції на i -му кроці навантаження, $\Delta u^{(k)}$ - приріст переміщення на k -й ітерації, N -нелінійні добавки, обумовлені переміщеннями $u^{(k-1)}$, отриманими на попередніх ітераціях, $P^{(i)}$ - вектор навантажень на i -му кроці навантаження. Переміщення на k -й ітерації визначаються як

$$u^{(k)} = u^{(k-1)} + \Delta u^{(k)} = \sum_{j=1}^k \Delta u^{(j)}. \quad (17)$$

Ітераційний процес зупиняється, коли $u^{(m)} \approx u^{(m-1)}$ з заданою точністю. Після цього робиться крок по навантаженню, по зміні геометрії конструкції переобчислюється матриця жорсткості і ітераційний процес повторюється знову.

За допомогою розглянутого алгоритма розв'язано задачі визначення напружено-деформованого стану різних тіл з тріщинами.

На рис.1 приведені графіки розподілення растягуючих напружень навколо фронту тріщини в прямокутній плиті з наскрізними тріщинами та в суцільному циліндрі з поверхневою кільцевою тріщиною. Крива 1 отримана при розв'язанні в лінійній постановці. Криві 2 отримані при розв'язанні в нелінійній постановці. Аналіз результатів показує, що характер розподілення напружень для геометрично нелінійних високоеластичних тіл при сумарній відносній деформації до 40% співпадає з характером розподілень напружень, отриманих в лінійній постановці. Таким чином, як характеристичні параметри руйнування для таких матеріалів можна використовувати параметри лінійної механіки руйнування - коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН).

Для визначення КІН за допомогою МСЕ використовуються два підходи: прямі та енергетичні методи. При застосуванні прямих методів використовується відома асимптотика розподілення лінійних напружень і переміщень. По отриманим в результаті скінченноелементного розв'язання напруженням і переміщенням обчислюються КІН. При енергетичному підході по напруженням і переміщенням визначається інтенсивність вивільнення енергії при просуванні тріщини. Одним з найбільш загальних ефективних методів розв'язання задачі механіки руйнування в цьому випадку являється метод J -інтеграла. В тривимірній задачі механіки руйнування J -інтеграл обчислюється на поверхні малої трубки, що охоплює фронт тріщини. Для визначення

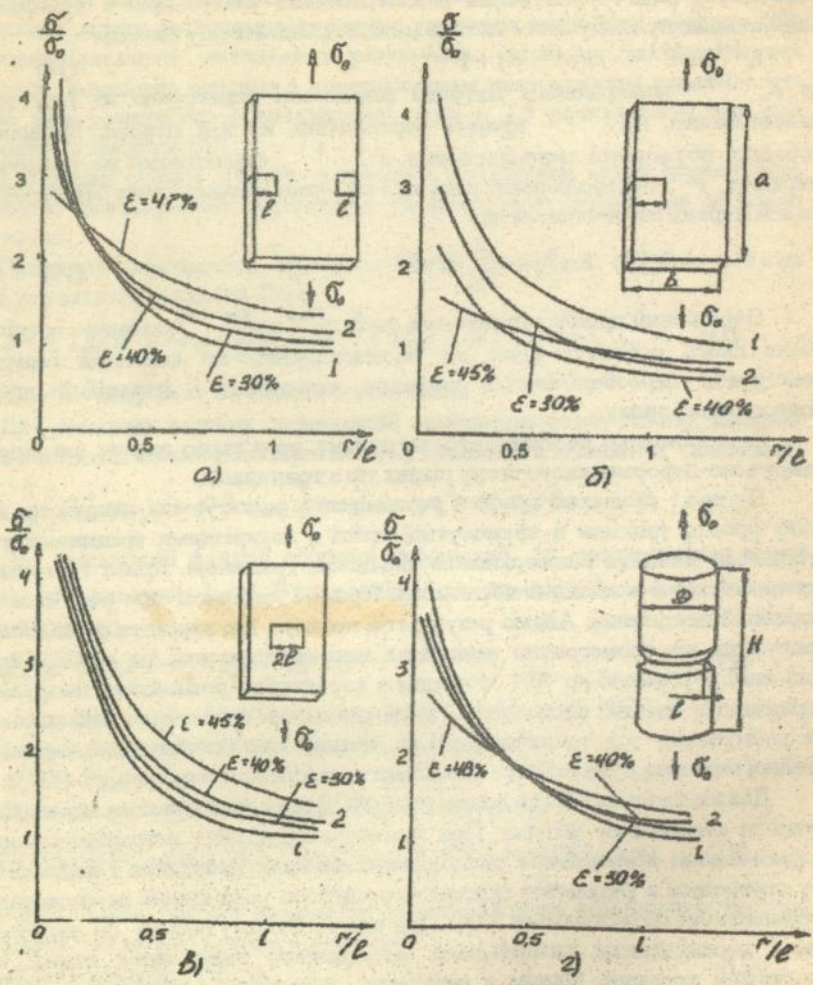


Рис. 1

J-інтеграла в тривимірній задачі використовується відомий метод еквівалентного об'ємного інтегрування. Враховуючи існуючі залежності між компонентами J-інтеграла, КІН та інтенсивністю вивільнення енергії можна визначити значення коефіцієнтів інтенсивності напружень. При обчисленні компонент J-інтеграла для конструкцій з тріщинами в умовах нелінійного деформування з використанням звичайного метода скінчених елементів при величій коефіцієнта Пуасона, перебільшуючої значення $\nu=0.46$, виникає розбіжність результатів. Застосування моментної схеми скінчених елементів з потрібною апроксимацією переміщень, деформацій та функції зміння об'єму, а також спеціального СЕ, дозволило врахувати стисливість матеріала та уникнути зазначених труднощів.

Розглянуті розв'язки методичних задач визначення КІН, які мають як аналітичне, так і чисельне (МСЕ) рішення в двумірній постановці.

На рис.2а приведені залежності КІН від довжини тріщини для плити з крайовою тріщиною. Крива 1 - аналітичний розв'язок, крива 2 - чисельний розв'язок, отриманий з використанням двумірних СЕ, крива 3 - розв'язок, отриманий з використанням спеціального СЕ методом J-інтеграла в тривимірній постановці. На рис.2б приведені залежності КІН від глибини тріщини для суцільного циліндра з кільцевою поверхневою тріщиною. Крива 1 - аналітичний розв'язок, крива 2 - чисельний розв'язок, отриманий з використанням двумірних СЕ, крива 3 - розв'язок, отриманий в тривимірній постановці. Обрахунки з використанням тривимірної постановки дають задовільні результати.

На рис.3 представлені залежності КІН від коефіцієнта Пуасона, вперше отримані для еластомерів з тріщинами. Застосовувались різні методи: крива 1 - прямий метод з використанням згущення лінійних СЕ; крива 2 - прямий метод з використанням запропонованого спеціального СЕ; крива 3 - метод J-інтеграла з використанням спеціального СЕ. На рис.3а представлено розв'язок для плити з крайовою тріщиною; на рис.3б - для плити з центральною тріщиною; на рис.3в - для плити з симетричними крайовими тріщинами. Застосування спеціальних елементів дозволяє отримувати стійкі результати при значно менших розмірах розрахункової сітки у порівнянні з лінійними елементами.

В третьому розділі представлено описання алгоритмів і взаємодії програм підсистеми CRACK обчислювального комплексу КОДВТОМ.

Головна програма RUPT виконує обчислення конструкцій з урахуванням геометричної нелінійності. В підпрограмі DATR відбувається формування початкових даних: полів координат конструкцій, топології, граничних умов та навантажень, що діють на конструкцію. Задаються параметри режиму роботи, параметри печаті, геометричні розміри конструкції.

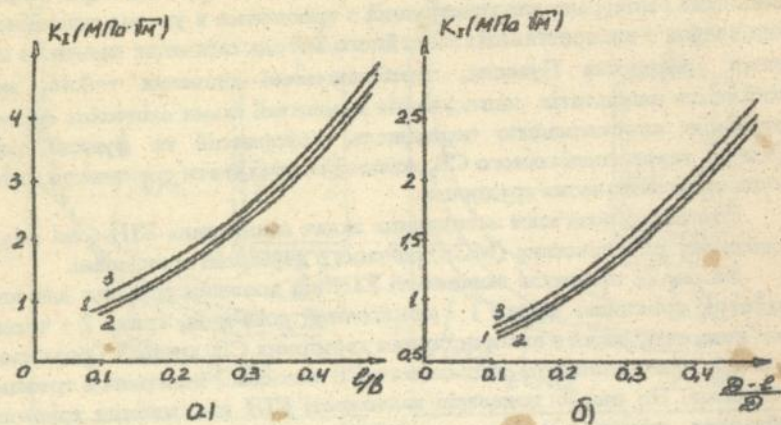


Рис. 2

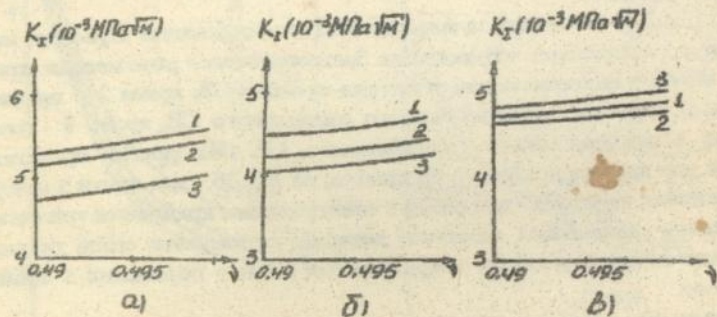


Рис. 3

Вузлові координати розрахункової сітки CE з урахуванням тріщини задаються в масиві X(NUX,3) (NUX - зарезервованій розмір масива) в підпрограмах CILKTR - для конструкцій циліндричної форми, KORPLI - для конструкцій прямокутної форми з наскрізними тріщинами, KAPRIZ - для призматичних конструкцій з поверхневими тріщинами.

Топологія об'єкта формується в масиві NF(NUX) и враховує різноманітні порожнини, вирізи та тріщини, які є в досліджуваній конструкції, а також наявність або відсутність вузлових переміщень, що задаються граничними умовами. В програмі DATR задаються також припоєднання інтенсивності навантажень DSPUS, інтенсивність кінцевого навантаження QRK або припоєднання переміщень UVIS, якщо йдеться мова про задачу на вимушені зміщення. В масиві Q(NUX,3) формуються вузлові навантаження по заданим інтенсивностям навантажень на поверхні конструкції. В підпрограмі NUSTRE обчислюються номери вузлів розрахункової сітки, які лежать на фронті тріщини. По номерах таких вузлів при формуванні матриці жорсткості CE визначаються спеціальні елементи, розташовані навколо фронту тріщини.

В блоці програм FORMAG формується матриця жорсткості конструкції з урахуванням типів використаних CE. Блок програм GAUSSBL виконує блочний алгоритм Гауса. Блок програм FORNEV виконує обрахунок реакцій та перевірку умов рівноваги у вузлах розрахункової сітки. В цьому блоці генеруються управляючі команди нелінійного алгоритму.

Після обчислення переміщень в програмі VICKIN визначаються параметри руйнування. В підпрограмах KINUS, KISIG обчислюються KIN прямим методом по переміщенням і по напруженням відповідно, в підпрограмі JINT обчислюються компоненти J-інтеграла, інтенсивності вивільнення енергії та KIN. В підпрограмі DELTRE визначається приріст розмірів тріщини, обраховуються змінені координати вузлів розрахункової сітки і, якщо необхідно, формуються управляючі команди повторення обрахунка нелінійних напружень та переміщень для конструкції з пророслою тріщиною.

В четвертому розділі приведені результати обрахунків еластомірних елементів конструкцій, в яких є тріщини.

На рис.4а приведені розподілення розтягуючих напружень навколо фронту поверхневої напівеліптичної тріщини в прямокутному брусі при різних умовах навантаження. Штриховані лінії представляють собою результати розв'язків з використанням лінійного тензора деформацій, безперервні лінії - з використанням нелінійного тензора деформацій. На рис.4б приведені графіки залежності KIN від розмірів тріщини для точок фронту тріщини, розташованих на поверхні бруса і в самому глибокому місці тріщини. Значення KIN представлені в нормалізованій формі.

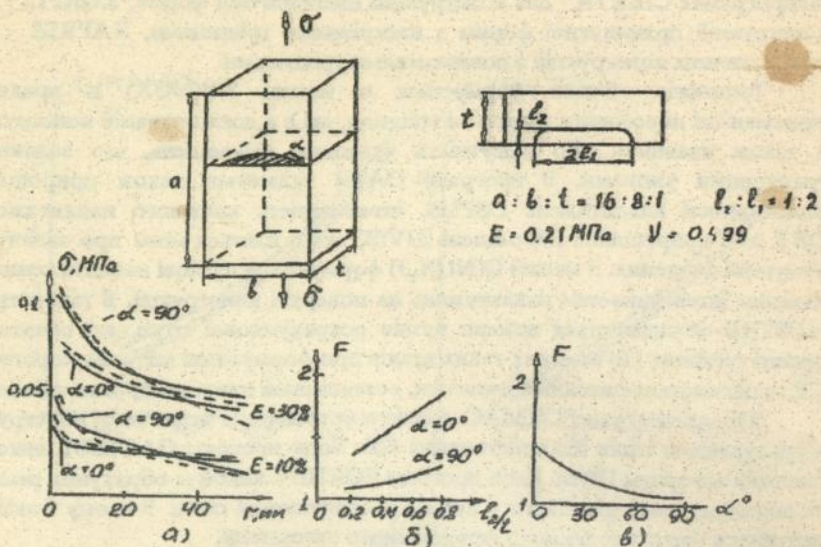


Рис. 4

$$l_2/l_1 = 0.8$$

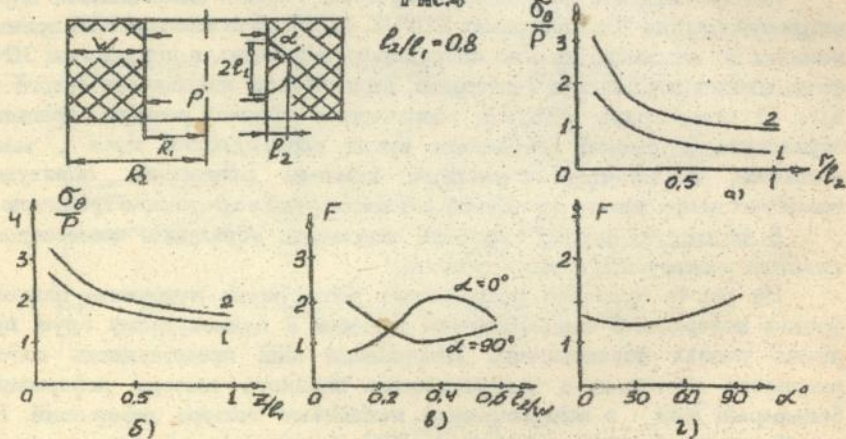


Рис. 5

$F = K_1(\theta) [\sigma_0 E(k) \sqrt{\pi l_1 / l_2} (l_1^2 \sin^2 \theta + l_2^2 \cos^2 \theta)^{1/4}]$, де $E(k)$ - еліптичний інтеграл. На рис.4в представлено розподілення КІН вздовж фронту тріщини. Урахування нелінійності дозволяє уточнити обрахунок у порівнянні з лінійною постановкою.

На рис.5а,б приведені графіки розподілення тангенціальних напружень навколо фронту продольної поверхневої напівеліптичної тріщини на внутрішній поверхні порожнистого еластичного циліндра ($\nu=0.499$), що знаходиться під внутрішнім тиском. На рис.5в приведені залежності КІН ($F = K_1/P \sqrt{\pi l_2}$) від розмірів тріщини ($l_2/l_1=0.8$). На рис.5г приведено розподілення КІН вздовж фронту тріщини ($l_2/W=0.4$). Аналізуючи результати можна зробити висновок, що напрямок переважного розвитку тріщини такої конфігурації залежить від глибини тріщини.

Розв'язані задачі визначення параметрів руйнування для елементів зсуву, виготовлених з гуми марки 15-1562 ($G=0.51$ МПа, $\nu=0.499$). На мал.6а приведено розподілення КІН вздовж фронту кутової тріщини в еластичному призматичному елементі зсуву типу БРМ102. На рис.6б приведено розподілення КІН вздовж фронту поверхневої нахиленої тріщини в елементі зсуву типу БРМ101. На рис.6в приведені графіки залежності розмірів тріщини від часу навантаження (l - довжина тріщини на поверхні елемента, h - глибина тріщини в самій глибокій точці), отримані з використанням кінетичного рівняння Черепанова. Результати чисельного розв'язка за допомогою запропонованого спеціального СВ задовільно співпадають з експериментальними даними.

В заключенні викладені основні результати, отримані в дисертації.

1. На основі моментної схеми скінчених елементів розвинуто методику чисельних досліджень пружного поведіння конструкцій із еластомерів, в яких є тріщини.

2. Стосовно до розв'язання задач пружності для еластичних конструкцій з тріщинами запропоновано спеціальний скінчений елемент, в якому враховується слабка стисливість високоеластичного матеріалу.

3. На основі модифікованого метода Ньютона-Канторовича розроблено алгоритм розв'язання задач механіки руйнування конструкцій, виготовлених із геометрично нелінійних матеріалів.

4. Вивчена збіжність чисельних розв'язків, отриманих по розробленій методиці при різних законах апроксимації та сітках скінченноелементної дискретизації.

5. Створено пакет прикладних програм CRACK для розв'язання тривимірних задач механіки руйнування, в якому реалізовано метод скінчених елементів на IBM PC в рамках обчислювального комплексу КОДЕТОМ.

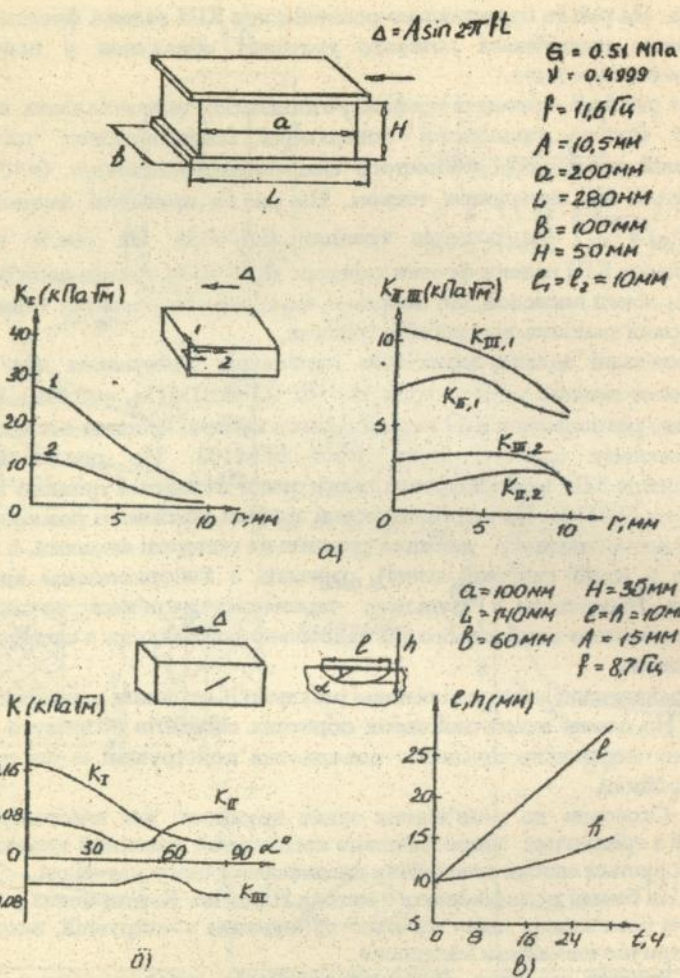


Рис. 6

6. Досліджено поля напружень навколо фронту наскрізних та поверхневих тріщин при різних величинах сумарної деформації конструкцій, отримані з використанням лінійного і нелінійного тензорів деформацій. На основі аналізу отриманих результатів зроблено висновки про придатність методів лінійної механіки руйнування для еластомірних конструкцій, що зазнають деформації до 40%.

7. За допомогою розробленого комплексу програм розв'язані задачі визначення напружено деформованого стану та параметрів механіки руйнування для гумометалевих елементів зсуву типу БРМ. Розв'язана задача про розвинення поверхневої тріщини в елементі зсуву типу БРМ101. Розв'язані задачі про параметри руйнування та досліджені поля напружень для еластомірного бруса з поверхневою напівеліптичною тріщиною, а також для порожнистого еластомірного слабостисливого циліндра з продольною напівеліптичною тріщиною на внутрішній поверхні.

Основні положення та результати дисертації викладені в наступних публікаціях:

1. Determination of the temperature of dissipative warming and parameters of fracture in elastomers with using of singular finite elements./ Kirichevsky V.V., Dokhnyak B.M., Kirichevsky R.V., Kozub Y.G. // Berichte des inter. Kolloq. über Anwenduggen der Informatik und der Mathematik in Arch. und Bauw., (IKM-97), Deutschland <http://www.uni-Weimar.de/>, 1997, s.1-6.

3. Трещинообразование и диссипативный разогрев конструкций из нелинейных эластомерных материалов./ Киричевский В.В., Докняк Б.М., Козуб Ю.Г., Киричевский Р.В.// 6-й Симпозиум "Проблемы шин и резинородных композитов. Математические методы в механике, конструировании и технологии". - Москва, 9-13 октября 1995. - с.133-135.

2. Прогнозирование развития усталостной трещины и диссипативного разогрева массивных и тонкослойных эластомерных конструкций с переменными физико-механическими параметрами./ Киричевский В.В., Докняк Б.М., Козуб Ю.Г., Киричевский Р.В.//7-й Симпозиум "Проблемы шин и резинородных композитов. Задачи на пороге XXI века". - Москва, 21-25 октября 1996г., с. 95-99.

4. Киричевский В.В., Козуб Ю.Г., Гребенюк С.Н. Энергетические методы определения параметров разрушения эластомерных конструкций при конечных деформациях// 8-й Симпозиум "Проблемы шин и резинородных композитов. Дорога, шина, автомобиль". - Москва, 20-24 октября 1997г., с. 242-246.

5. Киричевский В.В., Докняк Б.М., Козуб Ю.Г. Расчет параметров механики разрушения эластомеров методом конечных элементов./ Сборник трудов молодых ученых ЛСХИ, 1994г., с.55-60.

6. Киричевский В.В., Докняк Б.М., Козуб Ю.Г. Поля напряжений и перемещений в окрестности вершины трещины в конструкциях из геометрически нелинейных материалов./ Сб. научн. трудов Луганского с.-х.ин-та, 1997г., с.66-67.

7. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Проблемы и методы механики разрушения эластомеров., Луганск. с.-х. ин-т - Луганск, 1992.- библиогр.: 56 назв. - 22с. - Рук. деп. в Укр. НИИ НТИ 04.03.92, №284-Ук92.

8. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Построение матрицы жесткости специального конечного элемента для решения задач механики разрушения эластомеров. Луганск. с.-х. ин-т - Луганск, 1994.- библиогр.: 6 назв. - 34с. - Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 05.08.94 №1540 - Ук94.

9. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Определение коэффициентов интенсивности напряжений в эластомерах с трещинами.- Луган. с.х. ин-т.-Луганск, 1996.-11с.: ил.- библигр.: 4 назв.-Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 24.10.96, №2121-Ук96.

10. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Конечноэлементный алгоритм решения задач механики разрушения./ В кн.- Материалы науч.-техн. конф. сотрудников ЛСХИ по итогам 1992г., Луганск, 1993, с.95.

11. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Специальный конечный элемент для эластомеров с трещинами./ В кн.- Материалы науч.-техн. конф. сотрудников ЛСХИ по итогам 1993г., Луганск, 1994, с.51-52.

12. Козуб Ю.Г. Расчет резинового призматического элемента сдвига с учетом усталостного разрушения./ В кн.- Материалы нач.-техн. конф. сотрудников ЛСХИ по итогам 1995г., Луганск, 1996, с.107.

13. Усталостное разрушение элементов конструкций из эластомеров при циклическом нагружении с учетом диссипативного разогрева/ Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Киричевский Р.В.// Тезисы докл. II Международном симпозиуме по механике эластомеров, Севастополь, 1996, с.74.

АНОТАЦІЯ

Козуб Ю.Г. Процеси руйнування конструкцій із еластомерів в тривимірній постановці. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04-механіка деформівного твердого тіла. - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 1997.

Дисертацію присвячено питанням дослідження полів напружень навколо фронту наскрізних та поверхневих тріщин і розв'язання задач механіки руйнування конструкцій із геометрично нелінійних слабостисливих високоеластичних матеріалів на основі розробленого скінченноелементного алгоритма. Розроблено пакет прикладних програм CRACK в рамках обчислювального комплексу КОДЕТОМ, за допомогою якого вперше розв'язані задачі деформування та визначення параметрів руйнування еластомерних конструкцій з тріщинами. В якості основного метода рішення використовується метод J -інтеграла.

Ключові слова: еластомер, метод скінчених елементів, механіка руйнування, J -інтеграл.

АННОТАЦИЯ

Козуб Ю.Г. Процессы разрушения конструкций из эластомеров в трехмерной постановке. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела. Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1997.

Диссертация посвящена вопросам исследования полей напряжений в окрестности фронта сквозных и поверхностных трещин и решения задач механики разрушения конструкций из геометрически нелинейных слабосжимаемых высокоэластичных материалов на основании разработанного конечноэлементного алгоритма. Разработан пакет прикладных программ CRACK в рамках вычислительного комплекса КОДЕТОМ, с помощью которого впервые решены задачи деформирования и определения параметров разрушения эластомерных конструкций с трещинами. В качестве основного метода решения используется метод J-интеграла.

Ключевые слова: эластомер, метод конечных элементов, механика разрушения, J-интеграл

SUMMARY

Kozub Y.G. The processes of fracture of elastomer constructions in three-dimension position. - Manuscript.

The dissertation is the manuscript presented for a scientific degree of a candidate of technical sciences on a speciality 01.02.04 - mechanics of deformed solid. National technical university of Ukraine "Kiev polytechnic institute", Kiev, 1997.

The dissertation is devoted to research of stresses fields at a crack top and solve fracture mechanics problem to construction from a geometrical non-linear nearli-incompressible high-elastic materials with employment of preparing finite-element algorithm are defended. The package of applied computer programmes CRACK of a computer complex КОДЕТОМ, which help to solve the problems of deforming and determining of rupture parameters of elastomer constructions with cracs, is maked. The J-integral method is used as basic method of solution.

Key words: elastomer, finite element method, fracture mechanics, J-integral.

Ответственный за издание зам.директора по информационной работе И.Н.Яковенко
Редактор И.М.Богуславская

Подписано к печати 5.II.1997 г. Формат 60x84/16.

Облетная печать. Печ.л. I.58. Уч.-изд.л. I.50.

Тираж 100. Зая.№ 213 Цена договорная

Подразделение оперативной полиграфии ЛЦНТЭИ
348000, г.Луганск, Клясная пл., 4.

AB 38.808
AB 38.808