

УДК 531

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОПРУЖНОГО РУЙНУВАННЯ ЕЛАСТОМІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Киричевський В.В., Дохняк Б.М., Гребенюк С.М.

На основі методу скінченних елементів розроблена методика дослідження в'язкопружної поведінки еластомірних конструкцій із тріщинами. За допомогою запропонованої методики отримані параметри руйнування ряду конструкцій з урахуванням реологічних характеристик матеріалу.

Еластомірні елементи конструкцій знаходять широке застосування в різних галузях народного господарства, у таких як машинобудування, будівництво, транспорт та ін. Їх використання обумовлене унікальним сполученням ряду якостей: спроможністю під дією навантажень випробувати значні деформації без руйнування, слабкою стисливістю, наявністю релаксаційних явищ у процесі деформування.

У процесі експлуатації в конструкціях під дією навантажень можуть з'являтися різні дефекти, у тому числі тріщини. Навіть за наявності тріщин, еластомірні елементи конструкцій продовжують ще якийсь час виконувати покладені на них функції. Однак тріщина в конструкції є концентратором напружень, що приводить до збільшення діючих напружень біля вершини тріщини і як наслідок - руйнування конструкції. Тому питання про те, чи призведе наявність тріщини в конструкції до її руйнування при заданих умовах роботи, є дуже актуальним.

Цю проблему досліджено в роботі [1], де розглянуто залежність руйнування гуми від дисипації енергії, яка в свою чергу зумовлюється в'язкопружними якостями гуми. Наведено аналітичні розв'язки для конструкцій з тріщинами в умовах в'язкопружної деформації, розроблено методику визначення реологічних характеристик матеріалу [2]. У статті [3] запропоновано феноменологічну модель руйнування складних еластомірних конструкцій. Зроблено огляд сучасних уявлень про критерії руйнування твердих здеформованих тіл [4]. Чисельні дослідження методом скінченних елементів еластомірних конструкцій з тріщинами розглянуто в роботі [5]. На основі методу скінченних елементів розроблено методику розв'язання задач механіки руйнування в умовах в'язкопружного деформування [6]. Руйнування еластомірних конструкцій під впливом різних умов експлуатації досліджено в роботі [7].

Одним із найбільш ефективних методів дослідження в механіці деформованого твердого тіла і механіці руйнування є метод скінченних елементів (МСЕ). Однак при розрахунку конструкцій із слабкостисливих матеріалів, а також при розрахунку конструкцій, підданих дії великих згинальних моментів, традиційний МСЕ дає великі похибки. Уникнути цих труднощів дозволяє використання моментної схеми скінченного елемента (МССЕ) [8].

Для опису в'язкопружних властивостей еластомірів скористаємося спадковою теорією Больцмана-Вольтерра у вигляді:

$$\sigma^{ij}(t) = C^{ijkl} \left[\varepsilon_{kl} - \int_{-\infty}^t R(t-\tau) \varepsilon_{kl}(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

де C^{ijkl} – компоненти тензора пружних постійних.

В'язкопружні властивості еластомірів описуються за допомогою ядра релаксації Ржаниціна:

$$R(t-\tau) = A e^{-\beta(t-\tau)} (t-\tau)^{-\alpha}, \quad (2)$$

де A, α, β - параметри ядра релаксації.

Критерієм поширення тріщини є перевищення параметрами механіки руйнування критичних значень. У лінійній механіці руйнування, як правило, використовуються коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) і величина розкриття тріщини. Для визначення КІН використовуємо енергетичний метод - метод J-інтеграла. Компоненти J-інтеграла знайдемо методом об'ємного еквівалентного інтегрування. Зв'язок між коефіцієнтами інтенсивності напружень і компонентами J-інтеграла має вигляд [5]:

$$K_I = \frac{1}{2} \sqrt{D} (\sqrt{J_1 - J_2 - G_{III}} + \sqrt{J_1 + J_2 - G_{III}}), \quad (3)$$

$$K_{II} = \frac{1}{2} \sqrt{D} (\sqrt{J_1 - J_2 - G_{III}} - \sqrt{J_1 + J_2 - G_{III}}), \quad (4)$$

$$K_{III} = \sqrt{2\mu G_{III}}, \quad (5)$$

де K_I, K_{II}, K_{III} - коефіцієнти інтенсивності напружень,

G_{III} – інтенсивність звільнення пружної енергії,

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} - \text{модуль зсування,}$$

D – ефективний модуль пружності, рівний модулю пружності E для плоского напруженого стану і рівний $\frac{E}{(1-\nu^2)}$ для плоскої деформації.

Дана методика реалізована у вигляді пакета прикладних програм VISCRA обчислювального комплексу "МІРЕЛА"[9]. За допомогою даного комплексу розв'язані такі задачі.

Задача 1. Розтягання прямокутної плити з крайовою тріщиною. Розміри плити: ширина плити $a=2$ м, довжина $b=12$ м, товщина $h=0.02$ м. Параметри ядра Ржаніцина: $A=0.0765$, $\alpha=0.3$, $\beta=0.05$. Довжина тріщини $l=0.4$ м. Конструкція розраховувалася в умовах плоскої деформації. Фізичні постійні матеріалу конструкції: модуль пружності $E=2.1$ МПа, $\nu=0.49$. Прикладене навантаження $P=0.01$ МПа. Сітка розбиття конструкції - $3 \times 15 \times 15$. Наближений пружний аналітичний розв'язок[10]:

$$K_I = 5.446 \times 10^{-3} \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}, \quad \text{розкриття тріщини} \quad \frac{\delta}{2} = 5.208 \times 10^{-3} \text{ м}.$$

Результати чисельного розрахунку наведені на рис. 1.

Задача 2. Згинання прямокутної плити з крайовою тріщиною. Розрахункова схема наведена на рис.2. Розміри плити: ширина $a=1$ м, довжина $b=8$ м, товщина $h=0.1$ м. Параметри ядра Ржаніцина: $A=0.0765$, $\alpha=0.3$, $\beta=0.05$. Довжина тріщини $l=0.2$ м. Модуль пружності $E=1$ МПа. Прикладене навантаження $P=0.04$ кН.

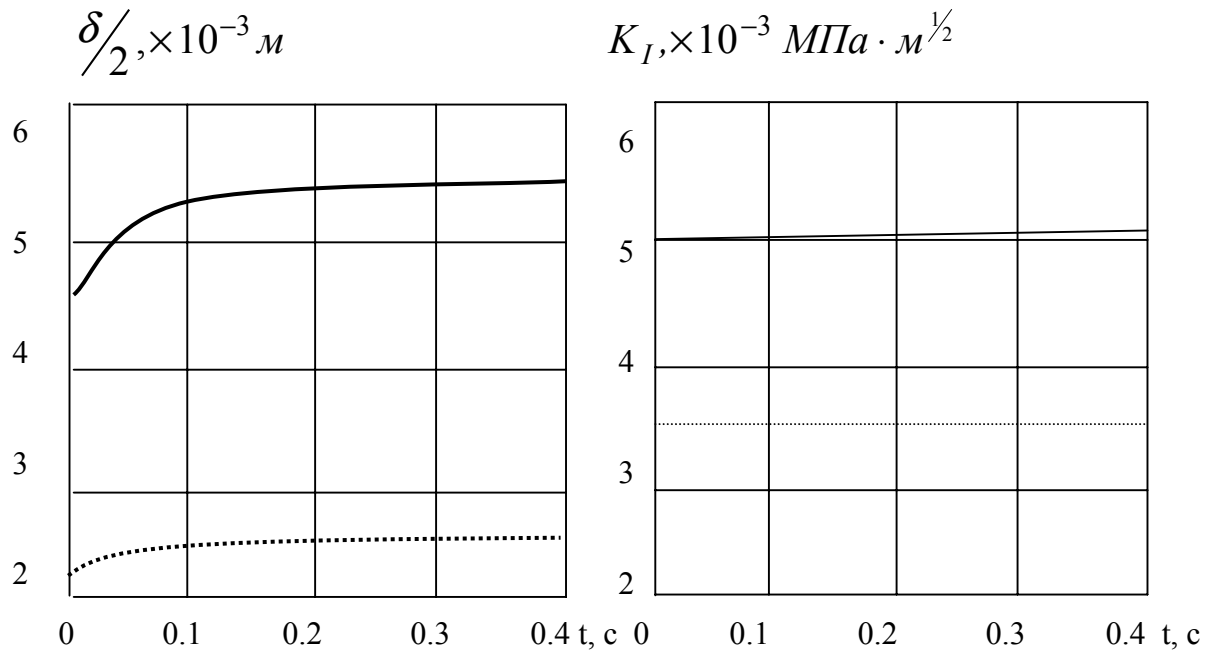
Наближений пружний аналітичний розв'язок[10]: для коефіцієнта Пуассона $\nu = 0.49$ -

$$K_I = 0.345 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}, \quad \text{розкриття тріщини} \quad \frac{\delta}{2} = 0.215 \text{ м}; \quad \text{для} \quad \nu = 0.4999 -$$

$$K_I = 0.345 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}, \quad \text{розкриття тріщини} \quad \frac{\delta}{2} = 0.212 \text{ м}.$$

Результати чисельного розрахунку наведені на рис.3. Сітка розбиття - $3 \times 13 \times 13$.

Висновки. Як видно з отриманих значень, при розрахунку еластомірних конструкцій із коефіцієнтом Пуассона $\nu = 0.49$ традиційний МСЕ дає дуже занижений результат, а при $\nu = 0.4999$ - свідомо невірний. Застосування МССЕ дозволяє одержувати прийнятні результати при розрахунку конструкцій із коефіцієнтом Пуассона, близьким до 0.5. Урахування реологічних характеристик матеріалу дозволяє уточнити параметри механіки руйнування реальних конструкцій. Як видно з наведених графіків, при даних реологічних характеристиках величина розкриття тріщини збільшується на 15-20% у порівнянні з пружним розв'язком, а коефіцієнти інтенсивності напружень не змінюються.



а)

б)

Рис.1. Напружено-здеформований стан плити з крайовою тріщиною (- МСЕ, -МССЕ).
а) розкриття тріщини; б) коефіцієнт інтенсивності напружень.

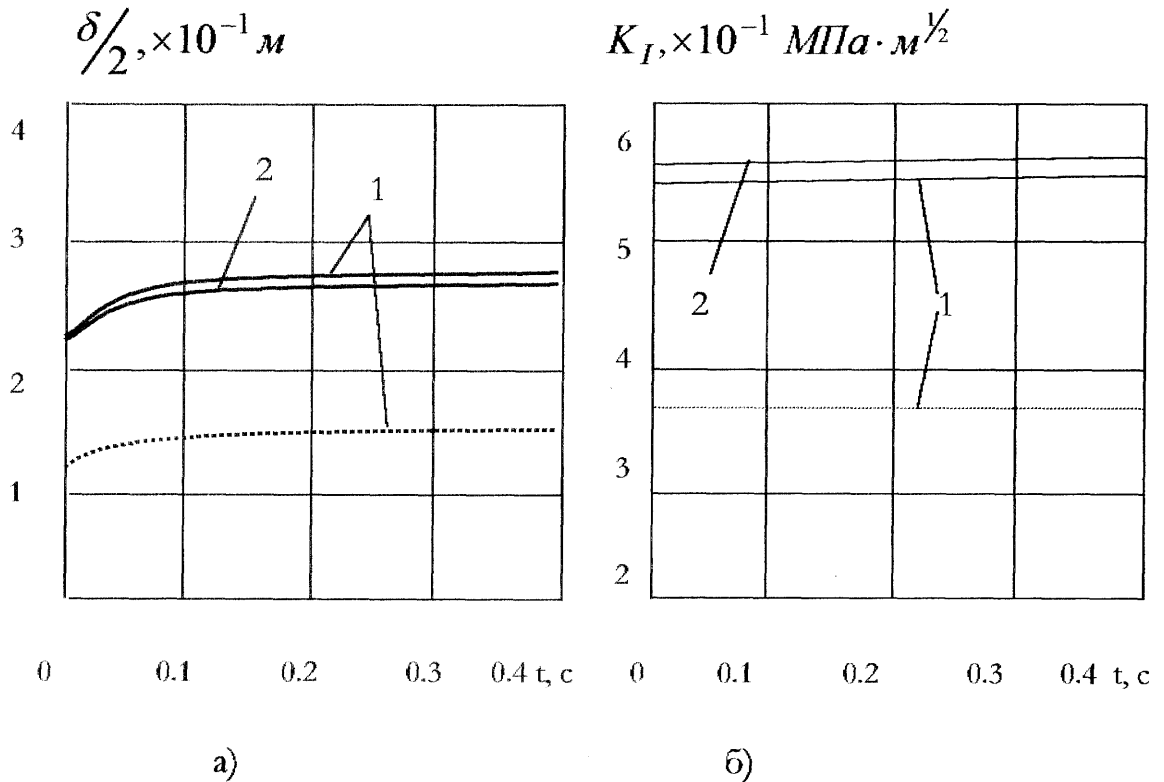


Рис.3. Згинання прямокутної плити з крайовою тріщиною.

(..... - МСЕ, _____ - МССЕ).

а) розкриття тріщини; б) коефіцієнт інтенсивності напружень.

1 - $\nu = 0.49$, 2 - $\nu = 0.4999$

ЛІТЕРАТУРА

1. Резиновые детали в инженерной практике / Дырда В.И., Чижик Е.Ф., Кияшко В.И., Карачабан Н.Г.- Днепропетровск, 1998.-303с.
2. Каминский А.А., Гаврилов Д.А. Механика разрушения полимеров. - К.: Наук. думка, 1988.-224с.
3. Каспаров А.А. К вопросу о построении феноменологической модели длительного разрушения сложных эластомерных конструкций // Геотехническая механика. – 1999. - № 11. – С. 58-68.
4. Чижик Е.Ф., Дырда В.И. Современные представления о критериях разрушения твердых деформируемых тел // Геотехническая механика. – 1999. - № 11. – С. 198-225.
5. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Метод конечных элементов в механике разрушения эластомеров. – К: Наукова думка, 1998.-200с.
6. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Щецова В.А. Физико - механическое моделирование процессов разрушения – СПб.: Политехника, 1993. – 391с.
7. Зуев Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации. – М.: Химия, 1980. – 268с.
8. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Под общ. ред. А.С.Сахарова и И.Альтенбаха. – К.: Вища школа, 1982.-480с.
9. Система “МІРЕЛА” для исследования прочности, долговечности и разрушения конструкций из эластомерных и композитных материалов в условиях нелинейного деформирования на основе метода конечных элементов / Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Киричевский Р.В., Мулик В.А., Карпушин А.Д., Гребенюк С.Н. // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию механико-машиностроительного и 50-летию сварочного факультетов 25-28 мая 1998г. Том 3, Национальный технический университет Украины (КПИ).1998.-С.136-139.
10. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. – М. Мир,1986.-334с.