

УДК 539.432:620

РОЗРАХУНОК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ВІБРАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

О.М. Черниш, канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Проведено аналіз методів розрахунку тріщиностійкості робочих елементів машин під дією вібрацій. Запропонована кореляція стандартного підходу до розрахунків кінетики росту мікротріщин на стадії їх зародження при циклічному навантаженні

Ключові слова: *тріщиностійкість, вібрація, мікротріщина.*

Проблема. В останній час разом із зростанням енергетичних потреб і більш раціональному використанні сільськогосподарської техніки збільшилися вимоги до їх конструкційного виконання та високої надійності у певних, інколи складних, умовах експлуатації. При цьому з'явилися задачі, що не можуть бути розв'язані традиційними методами на міцність та надійність. До таких випадків відносяться розрахунки на тріщиностійкість робочих елементів машин в умовах дії вібраційних навантажень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день завдяки розвитку сучасної дефектоскопії встановлено, що у більшості елементів конструкцій міститься значна кількість мікроскопічних тріщиноподібних дефектів [2, 7]. Цілком зрозуміло, що інколи економічно недоцільно відразу ж проводити заміну таких деталей, тому що їх повне руйнування не відбувається миттєво. Для вирішення цієї проблеми можна застосувати підходи механіки руйнування, яка є складовою частиною науки про механіку деформованого твердого тіла, і набула значний розвиток за останні десятиріччя. Дана галузь науки зараз набула стрімкого розвитку і являє собою сукупність методів, які дозволяють визначити границі безпечного використання деталей та конструкцій, що мають тріщиноподібні дефекти.

При цьому особливу увагу займає проблема крихкого руйнування при циклічному навантаженні із середніми напруженнями, що не перевищують границі текучості матеріалу. Досвід експлуатації при такому навантаженні вказує на те, що руйнування, яке складається із етапів зародження та розвитку тріщини, виникає задовго до вичерпання роботоздатності деталі і досягнення критичної величини навантаження. Майже завжди тривалість процесу руйнування від початку виникнення тріщини до досягнення нею критичного розміру займає дев'яносто і більше відсотків від часу життя деталі [3, 6, 8]. Тому цікавим є не стільки факт виникнення тріщиноподібних дефектів, скільки дослідження темпу їх росту.

У зв'язку з цим задача механіки руйнування має дві сторони, одна з яких містить аналіз (розрахунок) напружень, що виникають в елементі деталі з тріщиною. Іншою стороною є отримання експериментальних даних тріщиностійкості при певних умовах навантаження [2, 6].

Результати дослідження. Застосування стандартної умови міцності для деталі з тріщиною за типом: $\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_T}{n}$, де σ_T — границя текучості матеріалу; σ_{\max} — максимальне напруження, що виникає в зоні концентрації напружень; n — коефіцієнт запасу міцності, не підходить, тому що у полі напружень у пружній зоні біля вершини тріщини величина σ_{\max} є нескінченно великою.

Тут доцільніше використати параметр K_{\max} , який характеризує поле напружень у пружній зоні біля вершини тріщини і називається коефіцієнтом інтенсивності напружень.

У результаті умовою міцності в загальному вигляді буде наступна залежність:

$$K_{\max} \leq \frac{K_c}{n}, \quad (1)$$

де K_c — критичний коефіцієнт концентрації напружень (фізична константа матеріалу, що характеризує його тріщиностійкість).

Обґрунтування параметра K було закладено Ірвіном на підставі перетворення енергетичної моделі Гриффітса [6].

Гриффіте зв'язав величину напруження, прикладеного до кінців безкінечної пластини, із потенціальною енергією деформації, яка звільняється при виникненні тріщини одиничної довжини у випадку квазікрихкого руйнування в

умовах лінійно-пружного стану. Ірвін запропонував прийняти за критерій переходу до нестабільного стану руйнування момент, коли в матеріалі інтенсивність напружень біля вершини тріщини досягає критичного значення.

Складові поля напружень можна визначити згідно із теорією пружності як

$$\sigma_{i,j} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{i,j}(\theta), \quad (2)$$

де K — коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) біля вершини тріщини; r, θ — полярні координати з полюсом біля вершини тріщини; $f_{i,j}$ — функція кута θ .

Для трьох загальних випадків деформації: нормального відриву I , поперечного II та повздовжнього III зсувів виникають відповідно коефіцієнти інтенсивності напружень K_I, K_{II}, K_{III} .

У випадку першого випадку деформації I , який найбільш актуальний при плоскому пружно-деформованому стані вираз (2) в розгорнутому вигляді буде:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для центральної тріщини в пластині необмежених розмірів КІН в залежності від схеми навантаження визначається за формулами:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot l}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi \cdot l}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (4)$$

де σ, τ — однорідні нормальні та дотичні напруження в нескінченному контурі пластини.

Таким чином, інтенсивність поля напружень біля вершини тріщини контролюється єдиним параметром K — коефіцієнтом інтенсивності напружень.

Згідно припущень Ірвіна, розвиток тріщини може початися при досягненні коефіцієнта інтенсивності напружень деякого критичного значення K_c , яке характерне для кожного матеріалу. Тобто, тріщина не буде розвиватись, якщо виконується умова $K < K_c$ і буде збільшуватись, якщо $K = K_c$.

З іншого боку, в основу розрахунків елементів конструкцій за критерієм тріщиностійкості в умовах циклічного навантаження покладені експериментально

встановлені аналітичні апроксимації залежності між швидкістю розповсюдження тріщини і експлуатаційними значеннями параметра тріщиностійкості.

Однією з важливих експериментальних характеристик процесу руйнування з позицій механіки тріщин є S — подібна крива циклічної тріщиностійкості Париса, яка обмежена пороговим значенням коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} , і величиною циклічної тріщиностійкості матеріалу K_{fc} . Дана крива встановлює залежність швидкості руху тріщини $v = \frac{dl}{dN}$ від розмаху ΔK коефіцієнта інтенсивності напружень у логарифмічних координатах, де l — довжина тріщини; N — кількість циклів навантаження.

Розповсюдження тріщини за цією кривою відбувається за умови $K_{max} > K_{th}$, а її найдовший відрізок відповідає стадії стабільного росту тріщини і є лінійним.

Це дає можливість апроксимувати цей відрізок рівнянням:

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta K)^n, \quad (5)$$

або у загальному вигляді:

$$\frac{dl}{dN} = f(\Delta K, K_{max}, m_i), \quad (6)$$

де A, m — параметри, які визначаються експериментальним шляхом.

В результаті довговічність деталі або елемента конструкції під дією циклічного навантаження можна визначити інтегруванням попереднього виразу:

$$N = \int_{l_{min}}^{l_c} \frac{dl}{f(\Delta K, K_{max}, m_i)}. \quad (7)$$

Якщо деталь або елемент конструкції знаходиться під дією напружень, що змінюються із різною амплітудою (наприклад блочний спектр навантаження), то можна використати метод чисельного інтегрування.

Будемо вважати, що розвиток тріщини довжиною l_i на i -му циклі з амплітудою a_i повністю визначається експериментальними кривими $\frac{dl}{dN} = f(\Delta K)$ при різних K_{max} , причому

$$\Delta K_i = A \cdot \sigma \cdot a_i \cdot \sqrt{\pi \cdot l}. \quad (8)$$

Наведена модель та схема розрахунку довговічності дуже спрощена, а загальні методи, які розроблені в механіці тріщин, виявляються достатньо ефективними лише при розв'язанні задач в межах маломасштабної текучості. При цьому пластична зона, що виникає біля вершини тріщини, вважається досить малою порівняно із розмірами тріщини та елементом конструкції. Це пов'язано з тим, що при обґрунтуванні умов руйнування використовується параметр ΔK , який в певній мірі спирається на теорію пружності.

Але за останніми експериментальними дослідженнями розвиток поверхневих мікротріщин (довжиною від 0,01 до 0,1мм) не підпорядковується закономірностям, що встановлені для тріщин більшої довжини. Їх розвиток може спостерігатись при значеннях КІН, менших ніж порогові.

При розв'язанні цієї проблеми треба прийняти до уваги локальну пластичну деформацію у поверхневому шарі матеріалу. Враховуючи те, що поверхневий шар пластини деформується раніше ніж в глибині, можна припустити, що зародження мікротріщин є результатом дії локальної пластичної деформації ε_p і контролюється тільки її розмахом.

При цьому величину КІН визначити неможливо, тому що розмір тріщини у цьому випадку наближається до нуля.

Для описання даного процесу був запропонований двохпараметричний критерій, який пов'язаний із розмахом пластичної деформації і контролює концентрацію напружень при наявності мікротріщини.

Таким чином, при значеннях КІН, менших, ніж порогові ΔK_{th} зародження і розвиток поверхневих мікротріщин відбувається внаслідок циклічної пластичної деформації $\Delta\varepsilon_p$, яка виникає у послабленому поверхневому шарі.

Разом із збільшенням довжини тріщини, коли буде виконана умова $\Delta K > K_{th}$, вплив розмаху номінальної пластичної деформації стає незначним і подальший розвиток тріщини підпорядковується відомим законам пружної механіки тріщин.

Згідно експериментальних даних для сталі 20Х13 (рис.) було визначено, що криві швидкості росту поверхневих мікротріщин задовільно апроксимуються рівнянням виду:

$$\frac{dl}{dN} = B(\Delta\varepsilon_p - \Delta\varepsilon_{pth})^m, \quad (9)$$

де $\Delta\varepsilon_{pth}$ — порогове значення розмаху пластичної деформації на поверхні при зародженні мікротріщини; B, m — емпіричні коефіцієнти, які характеризують

стан поверхневого шару і тріщиностійкість матеріалу (для даного випадку $B = 3,15$; $m = 2,04$).

Розмах номінальної пластичної деформації знаходили за формулами:

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta \sigma}{E}, \quad (10)$$

$$\Delta \sigma = \sigma_a - \Delta \sigma'_T, \quad (11)$$

де σ_a — амплітуда нормальних напружень розтягу; E — модуль пружності матеріалу; $\Delta \sigma'_T$ — границя текучості на поверхні сталі (для даного випадку $\Delta \sigma'_T = 250$ МПа).

При розрахунках КІН було встановлено співвідношення глибини і довжини тріщини $a/2l = 0,5$.

Тоді

$$\Delta K_I = 1,21 \frac{2}{\pi} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (12)$$

де l — половина довжини тріщини.

Із поправкою на номінальну пластичну деформацію еквівалентний КІН можна знайти як

$$\Delta K_{Ip} = K_I \left(1 + \frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_c} \right)^2, \quad (13)$$

де $\Delta \varepsilon_c$ — розмах пружної деформації в процесі розвитку тріщини.

Величину розмаху пластичної деформації та співвідношення із розмахом пружної деформації можна визначити із виразів

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{1}{E} \left(\sigma_a - \sigma'_T - j \frac{d\sigma'_T}{dN} l \right), \quad (14)$$

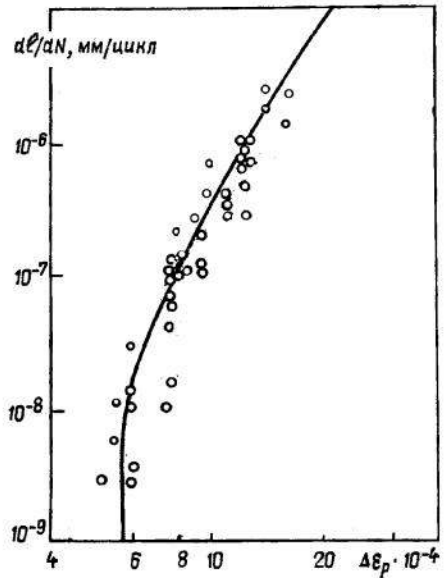


Рис. Крива швидкості росту поверхневих мікротріщин сталі 20Х13

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_c} = \frac{\sigma_a}{\sigma'_T + j \frac{d\sigma_T}{dH} l} - 1, \quad (15)$$

де $j \frac{d\sigma_T}{dH}$ — градієнт границі текучості у поверхневому шарі матеріалу; j — характеристика конфігурації пластичної локальної зони (в даному випадку $j = 0,25$).

В результаті швидкість росту тріщини може бути представлена сумою двох складових: розмахом номінальної пластичної деформації — характеристикою стану об'єму матеріалу та розмахом КІН — характеристикою вже сформованої тріщини:

$$\sum \frac{dl}{dN} = \frac{dl}{dN}(\Delta \varepsilon_p) + \frac{dl}{dN}(\Delta K_{Ip}), \quad (16)$$

Складову $\frac{dl}{dN}(\Delta \varepsilon_p)$ можна знайти із залежності на рис., а складову

$\frac{dl}{dN}(\Delta K_{Ip})$ — згідно рівняння Париса (5).

Отримані експериментальні дані для випробуваного матеріалу і аналітичні розрахунки показали задовільні результати.

Висновки. Запропонована емпірична модель аналітично описує кінетику процесу зародження поверхневих мікротріщин при симетричному циклі навантаження з точки зору впливу на цей процес фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалу. Припущено, що фізичною причиною зародження та росту таких мікротріщин є локальна пластична деформація, що виникає в поверхневому шарі матеріалу при напруженнях, значно менших від номінальної границі текучості.

Це дозволяє більш ґрунтовно підійти до визначення довговічності деталей та елементів конструкцій із тріщиноподібними дефектами, які працюють в умовах вібрацій і дії знакозмінних циклічних навантажень.

Бібліографія

1. Александров А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П., Державин. — М.: Высшая школа, 2003. — 560 с.

2. *Биргер И.А.* Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. –М.: МАИ, 1994. — 511 с.
3. *Болотин В.В.* Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
4. *Горшков А.Г.* Сопротивление материалов / А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашилин. — М.: Физматлит, 2005. — 544 с.
5. *Прокопенко А.В., Черныш О.Н.* Развитие коротких поверхностных усталостных трещин в стали 20Х13 и сплаве ВТ9// Проблемы прочности, 1989. — № 5. — С. 12-16.
6. *Троценко В.Т.* Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Троценко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. — К.: Наук. думка, 1987. — 256 с.
7. *De Los Rios E., Tang Z., Miller K.J.* Short crack fatigue behavior in a medium carbon steel // Faigue Eng. Mater. Struct. — 1984. — № 7.
8. *Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H.* Fatigue microcracks in a low-carbon steel // Ibid, 1985. — № 2.

РАСЧЕТ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Проведен анализ методов расчета трещиностойкости рабочих элементов машин под действием вибраций. Предложена корреляция стандартного подхода к расчетам кинетики роста микротрещин на стадии их зарождения при циклическом нагружении.

Ключевые слова: трещиностойкость, вибрация, микротрещина.

CALCULATION CRACK RESISTANCE VIBRATIONAL ELEMENTS OF AGRICULTURAL CARS

The assaying of methods of calculation crack resistance working elements of cars under the influence of vibrations is carried out. Correlation of the on-gauge approach to calculations of growth kinetics of crazes at a stage of their origin is offered at a cyclic stressing

Key words: crack resistance, vibration, at a stage.