

УДК 539.432

ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗА НАЯВНОСТІ ГОСТРОГО КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ

Герасимчук¹ О.М., Герасимчук² О.М.

1 - Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, Україна

2 - Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Вплив концентрації напружень під час аналізу втомної міцності зразків та елементів конструкцій зазвичай представляється ефективним коефіцієнтом концентрації напружень, K_f , що визначається як

$$K_f = \Delta\sigma_e / \Delta\sigma_{e,k}, \quad (1)$$

де $\Delta\sigma_e$ – границя витривалості гладких зразків, у термінах розмаху напружень циклу; $\Delta\sigma_{e,k}$ – границя витривалості зразків з концентратором. Значення $\Delta\sigma_e$ і $\Delta\sigma_{e,k}$ зазвичай визначаються експериментально, проте багатьма дослідниками свого часу робились спроби визначити K_f за допомогою тих чи інших параметрів.

У праці [1] було запропоновано наступну модель для оцінки границі витривалості, $\sigma_{-1,k}$, зразків з концентратором за симетричного циклу навантаження:

$$\sigma_{-1,k} = \frac{E\sqrt{b}}{K_t} \sqrt{1/l_c + 4,5/\rho}, \quad (2)$$

де K_t – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень для концентратора з радіусом ρ у вершині; E – модуль пружності; b – модуль вектора Бюргерса; l_c – критична відстань.

Критична відстань l_c – це відстань від вершини концентратора (в напрямку, перпендикулярному прикладеному нормальному напруженню), на якій розмах локальних напружень досягає рівня границі витривалості гладких зразків під час дії розмаху номінальних напружень, що дорівнює границі витривалості зразків з концентратором.

Формула (2) аналогічна формулі (1), де

$$K_f = K_t / \sqrt{1 + 4,5 \cdot l_c / \rho}, \quad (3)$$

а границя витривалості гладких зразків за симетричного циклу навантаження, $\sigma_{-1,e}$, розраховується наступним чином [1]:

$$\sigma_{-1,e} = E\sqrt{b} / \sqrt{l_c}. \quad (4)$$

Критичну відстань, l_c , можна оцінити за феноменологічною залежністю від розміру зерна, d , як

$$l_c = E^2 b \left(A + B \cdot \arctg \left(\left(E\sqrt{b} / (4d) - A \right) / B \right) \right)^{-2}, \quad (5)$$

де $A = (\sigma_f + \sigma_p) / 2$; $B = (\sigma_p - \sigma_f) / \pi$; $\sigma_f \cong ME [2(1+\nu)]^{-1} \cdot 10^{-3}$ – напруження внутрішнього тертя в кристалічній ґратці; σ_p – границя пропорційності; ν – коефіцієнт Пуассона; M – фактор Тейлора.

Модель (2) добре працює для «тупих» та «мілких» концентраторів, тобто коли $K_t \leq 4$. Натомість для концентраторів іншого типу, «гострих» та «глибоких» ($K_t > 4$), втомна міцність може визначатись пороговим розмахом номінального напруження, $\Delta\sigma_{th}$, за якого від вершини концентратора ініціюється втомна тріщина, що проростає до певного розміру і

припиняє своє подальше поширення внаслідок поступово зростаючого ефекту закриття берегів тріщини позаду її вістря.

У даній праці пропонується модель, що є модифікацією моделі Чапетті [2]. Модель може бути використана для оцінки втомної міцності зразків/елементів конструкцій, які містять глибокі та гострі концентратори напружень або поверхневі дефекти, що можуть бути представлені як початкові тріщини. Рівняння граничної кривої порогових напружень у термінах максимального напруження циклу за симетричного циклу навантаження для концентратора глибиною D пропонується у наступному вигляді:

$$\sigma_{th} = \frac{K_{th,d} + (K_{th,LC} - K_{th,d})(1 - e^{-k(l-d)})}{Y\sqrt{\pi(D+l)}}, \text{ за } l \geq d, \quad (6)$$

де

$$K_{th,d} = \sigma_{-1,e} Y_1 \sqrt{\pi \cdot d}, \quad (7)$$

$$K_{th,LC} = \sigma_{-1,e} Y_2 \sqrt{\pi \cdot l_s} = K_{th,d} (Y_2 / Y_1) \sqrt{l_s / d}, \quad (8)$$

$$k = \frac{K_{th,d}}{l_c (K_{th,LC} - K_{th,d})} = \left[l_c \left(\frac{Y_2}{Y_1} \sqrt{\frac{l_s}{d}} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (9)$$

Враховуючи (4), (7) – (9), рівняння (6) набуває вигляду:

$$\sigma_{th} = E\sqrt{b/l_c} \cdot Y_1 \sqrt{d} \frac{1 + \left(\sqrt{l_s/d} - 1 \right) \left\{ 1 - \exp \left[(d-l) / \left(\left(\sqrt{l_s/d} - 1 \right) l_c \right) \right] \right\}}{Y\sqrt{D+l}}, \text{ за } l \geq d \quad (10)$$

де Y_1 – геометричний фактор для мікро структурно короткої тріщини глибиною в один розмір зерна d , $0,67 \leq Y_1 \leq 0,73$ залежно від M [1]:

$$Y_1 = Y_2 \left(2\sqrt{1/(d/l_s + 1)} - 1 \right), \quad (11)$$

де Y_2 – геометричний фактор для довгої тріщини (ДТ), $Y_2 = 0,73$ [3]; Y – геометричний фактор для концентратора разом з тріщиною, $D+l$. Оскільки відношення $1 \leq Y_2 / Y_1 \leq 1,09$ є несуттєвим для рівняння (10), ним можна знехтувати.

Параметр l_s розраховується за формулою, запропонованою у [3]:

$$l_s = \left(d \cdot 8^2 \cdot \pi (1+\nu)^2 h \right) / (12 \cdot M^2 b), \quad (12)$$

де h – відстань між сусідніми паралельними площинами ковзання у кристалічній ґратці залежно від того, яка система ковзання активується відповідно до визначеного фактора Тейлора. Як було показано у [3], параметр l_s характеризує глибину поверхневої напівкруглої фізично малої тріщини (ФМТ) під час зміни механізму її розповсюдження в гладких зразках за рівня одновісного напруження розтягу, що перевищує границю витривалості на нескінченно малу величину. З іншого боку, цей параметр характеризує глибину поверхневої напівкруглої ФМТ, на якій досягається максимальний рівень закриття у її вістрі, що відповідає рівню закриття ДТ за рушійної сили, еквівалентної $K_{th,LC}$ (див. формулу (8)).

Для розрахунку за запропонованою моделлю і порівняння з експериментальними результатами було обрано дані праць [4] та [5]. На рис. 1 наведено криві (суцільні лінії), розраховані за рівнянням (10), порівняно з експериментально отриманими у [4] та [5] даними (точки) вимірювань розміру тріщини, l , що утворилась від вершини концентратора і далі не розповсюджується, для декількох рівнів навантаження зразків. Як видно з рис. 1, розраховані криві порогових напружень добре узгоджуються з експериментальними результатами,

підтверджуючи таким чином достовірність запропонованої моделі. Перевагою запропонованої моделі є відсутність потреби проведення довготривалих і трудомістких випробувань на втому та втомну тріщиностійкість для отримання параметрів, необхідних для наповнення моделі. Для розрахунку за моделлю (10) достатньо лише дані про характеристики статичної міцності: E, ν, σ_p , які отримуються з випробувань на короточасний розтяг стандартних зразків з даного матеріалу, та характеристики мікроструктури: d, M, b, h , які визначаються з аналізу мікроструктури вихідного матеріалу.

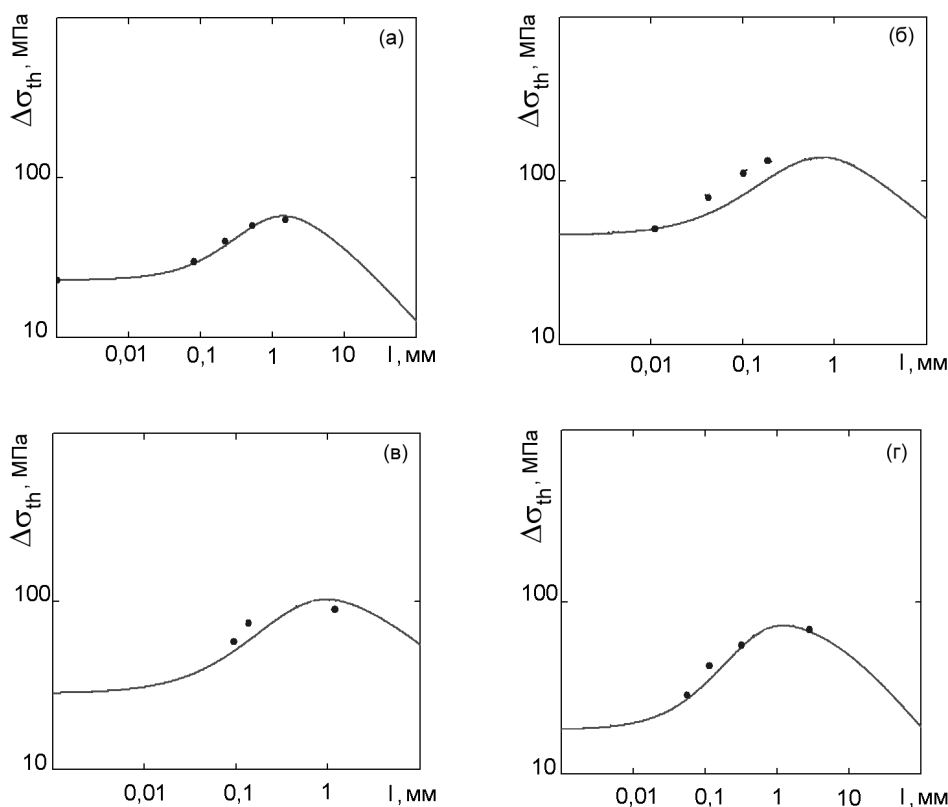


Рис. 1 Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними: (а) – для зразків зі сталі SM41B з крайовим концентратором $D = 3$ мм; (б), (в), (г) – для зразків зі сталі 25CrMo4 з різними розмірами крайового концентратора $D : 0,813$ мм, $2,19$ мм та $5,39$ мм відповідно.

Практичне значення запропонованої моделі полягає у можливості прогнозування розміру втомних тріщин, які не розповсюджуються за певного розмаху напружень, що надзвичайно важливо під час вирішення задачі прогнозування ресурсу елементів конструкцій за концепцією допустимого пошкодження.

Список літератури:

1. Herasymchuk O.M., Kononuchenko O.V., Bondarchuk V.I. Fatigue life calculation for titanium alloys considering the influence of microstructure and manufacturing defects // Int. J. Fatigue, **81**, 257–264 (2015).
2. Chapetti M.D. Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading // Int. J. Fatigue, **25**, 1319–1326 (2003).
3. Herasymchuk O.M. Microstructurally-dependent model for predicting the kinetics of physically small and long fatigue crack growth // Int. J. Fatigue, **81**, 148–161 (2015).
4. Tanaka K. and Akiniwa Y. Resistance curve method for predicting propagation threshold of short fatigue cracks at notches // Eng. Fract. Mech., **30**, 863–876 (1988).
5. Maierhofer J., Ganser H.P., Pippin R. Modified Kitagawa–Takahashi diagram accounting for finite notch depths // Int. J. Fatigue, **70**, 503–509 (2015).