

УДК 539.375.3

В.Караїм; О.Панько; М.Когут, докт. техн. наук;

Н.Лебідь, канд. техн. наук

Львівський державний аграрний університет

ВИЗНАЧЕННЯ КІН ПРИ ЗГІНІ КОНСОЛЬНОЇ БАЛКИ З БОКОВОЮ ТРІЩИНОЮ БІЛЯ ЗАЩЕМЛЕННЯ

В роботі подано теоретико-експериментальні дослідження щодо визначення тріщиностійкості (K_I) матеріалу при деформуванні згином консольної балки з боковою тріщиною біля защемлення. Доведено, що значення K_I обчислені за отриманими формулами через фіксований прогин f і зусилля згину P , є близькими між собою, що свідчить про коректність запропонованого підходу для вибраної силової схеми.

Постановка проблеми та завдання дослідження. Аналіз руйнувань мостових ферм з металевими конструкціями, прогонів балок, а також різноманітних консольних важелів підйомно-транспортного та гірничого обладнання і машин показує, що основною причиною їх руйнування є як правило, наявність гострих концентраторів напружень, дефектів типу тріщин та низький опір матеріалу до поширення тріщини від дії зовнішніх чинників (статичні, ударні навантаження, низькі температури) тощо.

У зв'язку з тим виникає необхідність розробки методів і підходів визначення характеристик опору матеріалу поширенню в ньому тріщини, тобто характеристик тріщиностійкості δ_c з врахуванням службових властивостей матеріалу в конструкції. В цьому плані недостатньо відомостей щодо прогнозування працездатності елемента конструкції залежно від вибраної схеми деформування та типу дослідного зразка з врахуванням дії сумісних ударно-втомних навантажень та їх місця прикладання, а тому ставимо наступне **завдання**: отримати розв'язки щодо визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) для задачі згину консольної балки з боковою тріщиною біля защемлення при постійній стрілі прогину f , а також при фіксованому зусиллі P у випадку ударно-втомного деформування.

Аналіз стану питання. В механіці руйнування для визначення фундаментальної характеристики тріщиностійкості K_I матеріалу запропоновано ряд силових схем [1] руйнування лабораторних зразків з тріщинами. Кожна із них має як свої переваги, так і недоліки. Разом з тим, необхідно відзначити, що існують певні вимоги до зразків, які використовуються при оцінці тріщиностійкості матеріалу. Сюди належать їх вигляд, розміри, умови формування вихідної тріщини і проведення досліджень. Дотримання цих вимог найкраще забезпечує коректне визначення параметра K_I матеріалу схема статичного трьохточкового згину балкового зразка прямокутного перерізу з крайовою тріщиною [2]. Однією із силових схем, яка має практичне значення, є згин консольної балки із боковою тріщиною біля защемлення (рис.1). Ця силова схема характерна тим, що при консольному згині напружений стан по всій довжині балки постійний, але за рахунок защемлення і, наприклад, зварювання біля нього тут знаходиться найбільш небезпечний переріз з точки зору можливого зародження і поширення тріщини.

Мета роботи – розробка теоретико-експериментальної інженерної методики визначення тріщиностійкості (K_I) конструкційних матеріалів для умов ударно-втомних навантажень з використанням простої і ефективної схеми деформування консольним згином дослідного зразка-балки з боковою тріщиною біля защемлення з використанням основних положень механіки руйнування.

Науково-методичні підстави дослідження. Для досягнення поставленої мети зроблено аналіз досліджень такого класу задач, зокрема, використані метод граничної інтерполяції щодо визначення K_I для силової схеми трьохточкового згину балки з боковою тріщиною [2], формули підрахунків силової σ_{nom} і геометричної частин α_0 для згину півплощини з тріщиною [3,4] та зміни кута прогину балки з тріщиною [5]. Нижче спробуємо викласти послідовність визначення перелічених величин для нової задачі за

силовою схемою згину консольної балки з боковою тріщиною біля защемлення і використанням розробленої установки для проведення ударно-втомних випробувань балкових зразків згином [6].

Результати досліджень. Нехай балка прямокутного перерізу висоти h і ширини b жорстко защемлена на одному кінці і послаблена крайовою тріщиною глибини l , яка розміщена біля защемлення (рис.1) На віддалі L від защемлення балка згинається силою P . Необхідно визначити K_I для даної силової схеми.

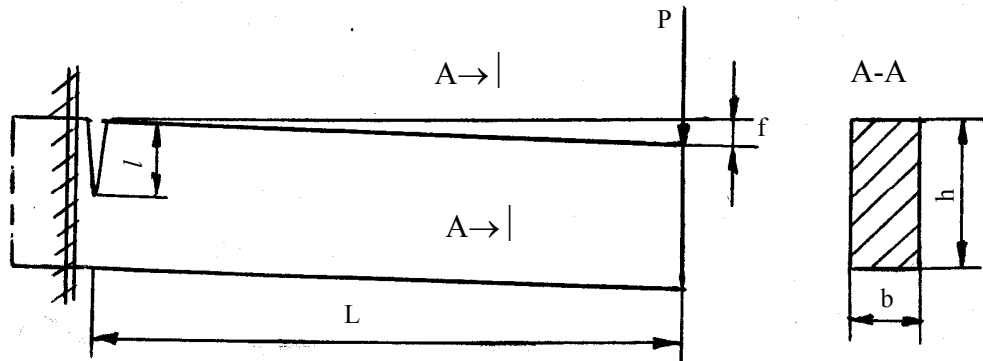


Рис.1. Схема згину консольної балки з боковою тріщиною біля защемлення

Задачу будемо розв'язувати методом граничної інтерполяції [2], для чого розглянемо граничні випадки задачі:

- а) неглибоку тріщину, коли $\varepsilon = l/h \rightarrow 0$;
- б) глибоку тріщину, коли $\varepsilon = l/h \rightarrow 1$.

Перший випадок ($\varepsilon \rightarrow 0$) відповідає задачі про розтяг півплощини з поверхневою тріщиною довжини l , до берегів якої прикладені напруження $\sigma = 6PL/(bh^2)$. Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) для цієї схеми визначено в роботі [3]:

$$K_I^{(0)} = \sigma_{nom}^{(0)} \cdot \alpha_0 \quad (1)$$

Згідно з методом граничної інтерполяції [2], розкладемо формулу (1) на силову $\sigma_{nom}^{(0)}$ і геометричну частини α_0 .

$$\sigma_{nom}^{(0)} = \frac{6PL}{bh^2}; \quad \alpha_0 = 1,9878 \sqrt{l} \quad (2)$$

У випадку глибокої тріщини $K_I^{(1)}$ відповідає згину півплощини з пів нескінченною тріщиною напруженнями $\sigma = 6PL/[bh^2(1-\varepsilon)^2]$.

Таку задачу розглядав Койтер [4] і для $K_I^{(1)}$ одержав співвідношення:

$$K_I^{(1)} = (3,9774PL)/(bh^{3/2}(1-\varepsilon)^{3/2}) \quad (3)$$

Звідки, згідно [2], для силової і геометричної частини одержимо:

$$\sigma_{nom}^{(1)} = \frac{6PL}{bh^2(1-\varepsilon)^2}; \quad \alpha_1 = 1,9878 \sqrt{h(1-\varepsilon)} \quad (4)$$

Підставляючи вирази (2), (4) в інтерполяційні співвідношення [2], одержимо:

$$K_I = \frac{11,9274 \cdot PL \sqrt{\varepsilon}}{bh \sqrt{h(1-\varepsilon)^{3/2}} \sqrt{1+7,9927\varepsilon}} \quad (5)$$

Формула (5) дає значення K_I при довільному ε і при постійній силі P . Формула (5) відрізняється від аналогічної формули для балки при трьохточковому згині [2] лише на постійний множник. В той же час, при дослідженні втомного підростання тріщини, досить часто необхідно мати величину K_I при постійному прогині f .

Залежність КІН від стріли прогину f встановлюємо так. Знаходимо стрілу прогину f для даної силової схеми навантаження від прикладеного зусилля P і довільної глибини тріщини. Для цього застосуємо інтерполяційний підхід [2].

В даному випадку стрілу прогину можна визначити із співвідношення:

$$f = [\sqrt{f_1 - f_{0/\varepsilon=0}} + \sqrt{f_0}]^2, \quad (6)$$

де f_1 - стріла прогину для глибокої тріщини при $\varepsilon \rightarrow 1$; f_0 - стріла прогину для неглибокої тріщини, коли $\varepsilon \rightarrow 0$.

Прогин зразка з глибокою тріщиною:

$$f_1 = L \sin \beta = L \beta \quad (7)$$

Тут β - кут між основою штампу і півплощиною, який визначено в роботі [5], і він дорівнює:

$$\beta = \frac{8PL(1-\mu^2)}{\pi b h^2 (1-\varepsilon)^2 E}. \quad (8)$$

В результаті:

$$f_1 = \frac{8PL^2(1-\mu^2)}{\pi b h^2 (1-\varepsilon)^2 E}, \quad (9)$$

де E - модуль Юнга, μ - коефіцієнт Пуассона.

Оскільки неглибока тріщина практично не впливає на прогин балки, то

$$f_0 = \frac{6PL^3}{bh^3 E}, \quad (10)$$

тобто f_0 дорівнює прогину бездефектної балки.

Підставляючи значення f_1 і f_0 в інтерполяційну формулу (6), одержимо:

$$f = \frac{8PL^2(1-\mu^2)}{\pi b h^2 E} \left[\sqrt{\frac{1}{(1-\varepsilon)} - 1} + \sqrt{\frac{6\pi L}{8(1-\mu^2)h}} \right]^2 \quad (11)$$

Позначивши $L/h = \varepsilon_1$, де L - довжина балки до надрізу; h - висота балки, і прийнявши для сталі $\mu = 0,3$ та $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, формулу (11) запишемо наступним чином:

$$f = \frac{2,3173P\varepsilon_1^2}{bE} \left[\sqrt{\frac{1}{(1-\varepsilon)^2} - 1} + \sqrt{2,589\varepsilon_1} \right]^2 \quad (12)$$

Отримана формула (12) дає залежність прогину від прикладеної сили P для довільної відносної глибини тріщини ε . Крім того, на рис.2 побудована графічна залежність безрозмірного прогину f^* від параметра ε за такою залежністю:

$$f^* = \frac{bE}{2,3173P\varepsilon_1^2} f = \left[\sqrt{\frac{1}{(1-\varepsilon)^2} - 1} + \sqrt{2,589\varepsilon_1} \right]^2 \text{ при } \varepsilon_1=10.$$

Як видно з рис.2 з ростом відносної глибини тріщини f^* зростає. Це означає, що з ростом глибини тріщини при постійній силі P прогин зростає, або, щоб забезпечити постійний прогин f при зростанні тріщини необхідно зменшувати навантаження P .

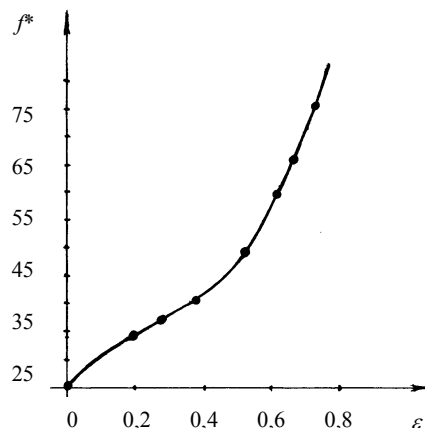


Рис. 2. Залежність безрозмірного прогину f^* від параметра ε .

Визначивши із залежності (12) силу P через прогин f і підставивши це отримане значення в формулу (3), одержимо вираз для K_I при постійній стрілі прогину f :

$$K_I = \frac{Ef}{\sqrt{h}} \cdot F(\varepsilon, \varepsilon_1), \quad (13)$$

де

$$F(\varepsilon, \varepsilon_1) = 5,147 \frac{\sqrt{\varepsilon} \left[\sqrt{\frac{1}{(1-\varepsilon)^2} - 1} + \sqrt{2,589\varepsilon_1} \right]^2}{\varepsilon_1 (1-\varepsilon)^{3/2} \sqrt{1+7,9927\varepsilon}} \quad (14)$$

Для спрощення розрахунку при визначенні коефіцієнта інтенсивності напружень K_I за формулами (13) і (14) значення функції $F(\varepsilon, \varepsilon_1)$ від відносного розміру бокової тріщини $\varepsilon = l/h$ показано на рис.3 графічною залежністю.

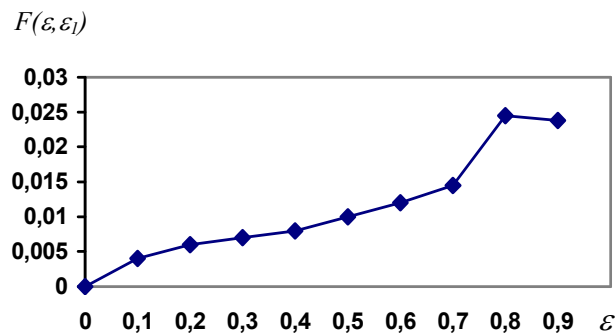


Рис.3. Графічна залежність функції $f(\varepsilon, \varepsilon_1)$ від параметра ε , при $\varepsilon_1 = 10$.

Таким чином, маючи геометричні розміри балкового зразка з тріщиною L, b, h, l і задавши прогин f для згину балки на консолі, а також користуючись графічною залежністю (рис.3) та формулою (13), легко і зручно можна визначити тріщиностійкість K_I матеріалу на балковому зразку із боковою тріщиною біля защемлення, деформованому згином на консолі.

Реалізація такого підходу здійснена на розробленій установці [6] шляхом ударно-втомного деформування балкових зразків (сталь 45, стан поставки), розмірів $b \times h \times 2L = 20 \times 35 \times 200$ мм. По середині їх довжини $L/2 = 100$ мм нарізали боковий надріз, глибиною $a = 5$ мм з радіусом дна закруглення дна $\rho \leq 0,1$ мм. Частота циклічного деформування $n = 70$ циклів за хвилину. Прогин на консолі балки задавали від ексцентрика розподільного вала установки величиною $f = 3$ мм, якому при відсутності тріщини відповідало зусилля $P_{3\sigma} = 1250$ Н.

Кількість циклів навантаження в процесі експерименту підраховували цифровим лічильником. Ріст тріщини на поверхні зразка фіксували катетометром КТМ-8-630. Величину прогину f на консолі зразка-балки фіксували індикатором годинникового типу при контактї його ніжки з торцевою поверхнею зразка.

Зазначимо, що при фіксованому прогині $f = 3$ мм, в процесі циклічного ударно-втомного деформування за $N = 4520$ циклів в зразку утворилася тріщина глибиною $l = 7,2$ мм з врахуванням глибини бокового надрізу, а підраховане за формулами (13,14) значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_I = 48,6 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. Значення K_I , підраховане за формулою (5) на підставі величини P , встановленої після статичного згину балки на консолі склало: $K_I = 50,7 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. Хороша збіжність цих значень для вибраної силової схеми підтверджує коректність наведених формул.

Отже, запропонована методика дослідження є ефективним інструментом оцінки міцності конструкційних матеріалів в умовах ударно-втомних навантажень лабораторних зразків за описаною розрахунковою схемою.

Висновки

1. Розроблено теоретико-експериментальну методику визначення КІН для схеми ударно-втомного деформування згином балкового зразка з боковим надрізом – тріщиною біля защемлення, яка дозволяє ефективно проводити такі дослідження при фіксованому прогині f або зусиллі згину P .
2. Враховуючи, що з ростом тріщини за сталої стріли прогину консолі балки зменшується величина прикладеного зусилля згину і швидкість поширення тріщини, то дану силову схему навантаження можна використати для визначення порогового коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ih} при ударно-втомних навантаженнях.
3. В перспективі інженерну методику визначення КІН на запропоновану силову схему можна буде застосовувати також для оцінки міцності конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань з урахуванням дії робочих середовищ (агресивних і малоактивних рідин, змащувальних оливо і мастил), низьких температур тощо.

This article is about theoretical and experimental research concerning the definition of coefficients intensity tense K_I owing to deformation of consic beams bend from the side crack not far from squeeze. That fact, that calculated values of crack resistance K_I for steel 45 after the got formulas through the fixed bending of f and P bend effort accordingly, is near between itself, it is possible to claim about correctness of offered approach for the chosen power chart.

Література

1. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Изд-во стандартов, 1985.- 62 с.
2. Панько І.М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій.- Львівський державний аграрний університет // Львів: Вид-во Національного університету ім. Ів.Франка. -2000. –280 с.
3. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацьшин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках.– К.: Наук. думка, 1976. – 443 с.
4. Койтер В.Т. Решение некоторых задач теории упругости асимптотическими методами // Приложение теории функции в механике сплошной среды. – М.: Наука.-1965. - Т.1. - С.15-31.
5. Мухелишвили Н.И. Некоторые основне задачи математической теории упру гости.-М.: Наука, 1966.- 708 с.
6. Караїм В.С., Когут М.С. Установка для ударно-втомних випробувань балкових зразків згином на консолі // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – Випуск 422, 2001. – С. 56-61.

Одержано 04.07.2002 р.