

## АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОДРІБНЮВАЛЬНИХ МАШИН ЗА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЮ

*Володимир Буртак, к. т. н., Тетяна Кохана, к. е. н., Руслан Барабаш, к. т. н.  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: vburtak-78@ukr.net; kohanat78@gmail.com; rbarabash@ukr.net*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.141-144>

### **Буртак В., Кохана Т., Барабаш Р. Аналіз методик оцінки міцності конструкційних матеріалів робочих елементів подрібнювальних машин за тріщиностійкістю**

Здійснено стислий огляд робочих органів подрібнювальних машин та основних способів подрібнення зерна. Розглянуто чинники, що спричиняють зношування та вихід із ладу цих робочих елементів. Запропоновано методики оцінювання міцності конструкційних матеріалів та їхніх зварних з'єднань із використанням балкових зразків із бічною тріщиною в умовах консольного та триточкового навантаження згідно з критерієм тріщиностійкості (КІС).

Проаналізовано методики консольного згину балки із боковим концентратором на стадії ініціювання втомної тріщини за асиметричного циклу за умови консольного згину балкового зразка з боковим концентратором, або триточкового згину такого зразка з боковим концентратором у шві, який встановлюють у вузол базування та закріплення. Отримано значення  $K_1$  у разі довільного  $e$  та сталої сили  $P$ , відповідно можна використовувати для визначення функціональної характеристики тріщиностійкості  $K_{1c}$  за описаною схемою консольного деформування балка із боковою тріщиною біля защемлення.

Проведено оцінку міцності стикових зварних з'єднань та розглянуто схеми триточкового згину балкового зразка із боковою тріщиною у металі вертикального шва стикового зварного з'єднання відповідно до силового критерію  $K_{1c}$ . Визначено  $K_{1c}$  металу шва зварного з'єднання, коли цей шов і тріщина у ньому перпендикулярно розташовані до основи зразка-балки.

Аналіз запропонованих методик визначення КІН згідно із схемами консольного та триточкового згинів балкових зразків із боковою тріщиною у матеріалі основи зразка або шва зварного з'єднання, відповідно є ефективними інструментами ранжування міцності конструкційних матеріалів та їхніх зварних з'єднань при виготовленні деталей робочих елементів подрібнювальних машин.

**Ключові слова:** робочий елемент, подрібнювальна машина, балковий зразок, зварні з'єднання, деформування.

### **Burtak V., Kokhana T., Barabash R. Analysis of methods for assessing the strength of structural materials of working elements of grinding machines in terms of crack resistance**

This text provides a concise review of the components of grinding machines and the primary methods of grain grinding. It discusses the factors that contribute to the wear and failure of these components. Additionally, it outlines methods for assessing the strength of structural materials and their welded joints using beam specimens with a lateral crack, evaluated under cantilever and three-point loading conditions according to the crack resistance criterion (CR).

An analysis of the methods of cantilever bending of a beam with a lateral concentrator at the stage of fatigue crack initiation under an asymmetric cycle is carried out under the condition of cantilever bending of a beam specimen with a lateral concentrator, or three-point bending of such a specimen with a lateral concentrator in the seam, which is installed in the base and fastening unit. The value of  $K_1$  is obtained in the case of arbitrary  $e$  and a constant force  $P$ , respectively. It can be used to determine the functional characteristic of crack resistance  $K_{1c}$  according to the described scheme of cantilever deformation of a beam with a lateral crack near the pinch point.

The strength of butt welded joints was assessed, and the schemes of three-point bending of a beam specimen with a lateral crack in the metal of the vertical weld of the butt welded joint were considered according to the strength criterion  $K_{1c}$ . The determination of  $K_{1c}$  of the weld metal of the welded joint was carried out when this weld and the crack in it are perpendicular to the base of the beam specimen.

Analysis of the proposed methods for determining the SIF according to the schemes of cantilever and three-point bending of beam specimens with a lateral crack in the material of the base of the specimen or the weld of the welded joint, respectively, are effective tools for ranking the strength of structural materials and their welded joints in the manufacture of parts of the working elements of grinding machines.

**Keywords:** working element, grinding machine, beam sample, welded joints, deformation.

**Постановка проблеми.** Використання механічних процесів подрібнення твердих тіл на частинки часто застосовують у сільськогосподарському виробництві. Найпоширеніші два основні методи подрібнення, зокрема просте та вибіркоче.

Якщо подрібнюваний матеріал є однорідним за хімічним складом і має приблизно однакові структурно-механічні властивості у всіх частинах, отримані після подрібнення частинки формують однорідну сипку масу. Такий метод називають простим подрібненням.

Якщо ж тверде тіло неоднорідне за складом, а його окремі компоненти характеризуються різними структурно-механічними властивостями під дією хімічних, біологічних чи механічних факторів, то під час подрібнення виникають частинки з відмінними розмірами та складом. Повторне застосування технологічних операцій подрібнення із послідовним просіюванням дає змогу отримати фракції різної дисперсності та якості. Цей процес відомий як вибіркоче подрібнення. Прикладом є виробництво борошна різних гатунків із певної партії пшениці.

Методи вибіркового подрібнення широко використовуються у борошномельному виробництві, де зміна геометричних і кінематичних параметрів вальців, а також величини питомого навантаження на робочі органи, дозволяє досягти високої ефективності використання зерна та забезпечити більший вихід борошна вищих гатунків.

Отже, процеси подрібнення важливі для багатьох галузей, зокрема для сільськогосподарської. Ступінь подрібнення та гранулометричний склад кінцевого продукту значною мірою визначаються типом робочих елементів, а також рівнем зношення їхніх поверхонь у технологічному процесі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед розмельного обладнання, що застосовується у сільськогосподарському виробництві, значного поширення набули машини ударно-протиральної дії, до яких належать ентолейтори, деташери та молоткові дробарки різних конструктивних виконань і типорозмірів. Дослідження таких машин відображено у низці праць [3–5; 7], де охарактеризована методика визначення їхніх основних геометричних, кінематичних і динамічних характеристик, а також розроблення моделей їхнього функціонування.

На різних етапах технологічного процесу подрібнення зерна застосовують різні типи обладнання, зокрема вальцові верстати марок А1-БЗН, А1-БЗ-2Н, Р6-БЗ-5Н, Р6-ДУ-20; молоткові

дробарки ДДМ, А1-ДМР, ДДК, ДЗ-Т-1; ентолейтор РЗ-БЗР та деташер А1-БДТ.

Сучасні вальцові верстати здійснюють процеси подрібнення сільськогосподарських матеріалів методом стиску і зсуву, молоткові дробарки та ентолейтори працюють згідно з принципом поєднання удару та стирання, а деташери й бильні машини забезпечують подрібнення завдяки одночасній дії стирання та ударів.

Аналіз наявних способів подрібнення та наведеної класифікації розмельного обладнання свідчить, що основними причинами втрати працездатності машин є зношування внаслідок тертя та руйнування елементів робочих органів від динамічних навантажень. Це стосується насамперед молотків, перетиральних дисків, дек, які з часом потребують відновлення або заміни, що зумовлює значні витрати.

У подальшому пропонуються ефективні методики оцінювання тріщиностійкості конструкційних матеріалів та зварних з'єднань (наплавки) елементів робочих елементів ударно-протиральних машин, що дозволяють здійснити ранжування їх міцності після відновлення.

**Постановка завдання.** Наше завдання – проаналізувати інженерно-теоретичні методики для оцінювання міцності матеріалів елементів робочих елементів подрібнювальних машин та їхніх зварних з'єднань за показником тріщиностійкості ( $K_{Ic}$ ). Балкові зразки із боковим концентратором тріщини шляхом випробувань при консольному та триточковому згинах дадуть змогу здійснити оцінку.

**Виклад основного матеріалу.** Використання ударно-втомної установки [2; 5; 8–12] дозволить проаналізувати методики консольного згину балки із боковим концентратором на стадії ініціювання втомної тріщини за асиметричного циклу за умови консольного згину балкового зразка з боковим концентратором, або триточкового згину такого зразка з боковим концентратором у шві, який встановлюють у вузол базування та закріплення (рис. 1).

*Визначення ( $K_{Ic}$ ) для консольної балки із боковою тріщиною біля защемлення за сталої сили прогину  $P$ .*

Нехай балка прямокутного перерізу з висотою  $h$  і шириною  $b$  жорстко защемлена на одному кінці та послаблена крайовою тріщиною глибиною  $l$ , яка розміщена біля защемлення (рис. 1). На віддалі  $L$  від защемлення балка згинається силою  $P$ .

Здійснюється визначення  $K_{Ic}$  за цією силовою схемою.

Згідно з методом граничної інтерполяції [13] здійснюється розв'язок відповідної задачі, при чому розглядаються два граничні випадки: неглибока тріщина, при  $e = l/h \ll 1$ ; глибока тріщина, при  $e = l/h \approx 1$

При ( $e \ll 1$ ) відповідність задачі про розтяг півплощини із поверхневою тріщиною довжиною  $l$ , до критеріїв якої прикладені напруження  $s = 6PL/(bh^2)$ .

Коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) згідно з цією схемою визначено у [5; 6]:

$$K_I^{(0)} = s_{\text{пот}}^{(0)} \times a_0 \quad (1)$$

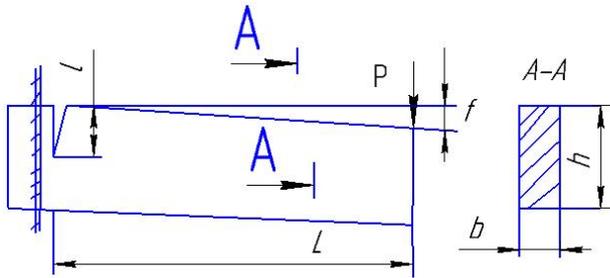


Рис. 1. Схема згину консольної балки із боковою тріщиною біля защемлення

Fig. 1. Scheme of bending of a cantilever beam with a lateral crack near the pinch point

Відповідно до методу граничної інтерполяції [4] розкладемо формулу (1) на силову  $s_{\text{пот}}^{(0)}$  та геометричну частини  $a_0$ .

$$s_{\text{пот}}^{(0)} = \frac{6PL}{bh^2}; \quad a_0 = 1,9878 \sqrt{l} \quad (2)$$

При глибокій тріщині  $K_I^{(1)}$  відбудеться згин півплощини із півнескінченною тріщиною та напруженнями  $s = 6PL/[bh^2(1-e)^2]$ .

Згідно з Койтером і для  $K_I^{(1)}$  отримаємо співвідношення:

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

Відповідно до [4], для силової та геометричної частин одержимо:

$$s_{\text{пот}}^{(0)} = \frac{6PL}{bh^2(1-e)^2}; \quad a_1 = 1,9878 \sqrt{h(1-e)} \quad (4)$$

При підставлянні виразів (2) та (4) в інтерполяційні співвідношення [5], отримаємо:

$$K_1 = \frac{11,9274PL\sqrt{e}}{bh\sqrt{h(1-e)^2}\sqrt{1+7,9927e}} \quad (5)$$

Згідно з формулою (5) отримаємо значення  $K_I$  у разі довільного  $e$  та сталої сили  $P$ , відповідно можна використовувати для визначення функціональної характеристики тріщиностійкості  $K_{Ic}$  за описаною схемою консольного деформування балка із боковою тріщиною біля защемлення.

Визначення (КІН) для балки із боковою тріщиною у вертикальному шві стикового з'єднання при триточковому згині.

Методика передбачає дослідження міцності швів для стикових зварних з'єднань за тріщиностійкістю ( $K_{Ic}$ ) [1; 4; 14; 15]. Вона полягає в оцінці міцності стикових зварних з'єднань та зводиться до розгляду схеми триточкового згину балкового зразка із боковою тріщиною у металі вертикального шва стикового зварного з'єднання згідно із силовим критерієм  $K_{Ic}$  (рис. 2).

Відповідно, вибирають балку довжиною  $2L$ , висотою  $b$  і товщиною  $h$ . Послаблена в поперечному перерізі боковою тріщиною завдовжки  $l$  і згинається зусиллям  $P$  (рис. 2).

Під час розв'язування задачі згідно з методом граничної інтерполяції розглядають два граничні випадки: глибока тріщина  $e = l/b \approx 1$ , та мілка тріщина  $e = l/b \ll 1$ .

У випадку глибокої тріщини ( $e \approx 1$ ) відбудеться згин моментом  $M = PL/2$  півплощини із півнескінченною тріщиною, яку розглянув Койтер, і одержано формулу:

$$K_I^{(1)} = 0,374\sqrt{P} \frac{\sigma_0 \sqrt{b}}{hb\sqrt{b(1-e)}\sqrt{1-e}} \quad (6)$$

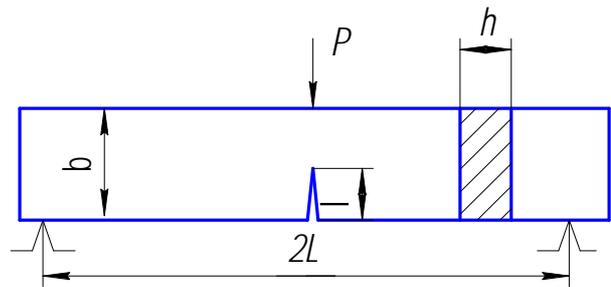


Рис. 2. Схема триточкового згину балкового зразка із боковою тріщиною у вертикальному шві

Fig. 2. Scheme of three-point bending of a beam specimen with a lateral crack in a vertical seam

Розділивши силову і геометричну частини, одержимо:

$$s_{\text{ном}}^{(1)} = 6M/[hb^2(1-e)^2]; \quad a_1 = 0,374\sqrt{P} \frac{\sigma_0 \sqrt{b(1-e)}}{hb\sqrt{b(1-e)}} \quad (7)$$

При інших граничних випадках, зокрема з мілкою тріщиною ( $e \ll 0$ ), інтенсивність напружень біля її вершини буде такою самою, як і у півплощині із поверхневою тріщиною глибиною  $l$ , до берегів якої прикладені напруження  $s = 3PL/(hb^2)$ .

Отож, скориставшись результатами роботи Андрейківа [1], одержимо:

$$s_{\text{ном}}^{(0)} = 6M / hb^2; a_0 = 1,4056 \sqrt{2l}. \quad (8)$$

Якщо підставити вирази (7) і (8) у інтерполяційні формули Нейбера, та провівши необхідні обчислення для визначення  $K_1$  металу шва стикового зварного з'єднання, одержимо:

$$K_1 = 11,9274 \sqrt{e} M / [h \sqrt{b} (1 - e)^2] \times \sqrt{1 + 7,9927e}, \quad (9)$$

де  $e = l/b$  - відносний розмір тріщини;  $l$  - довжина тріщини в металі прямого шва;  $b$  - висота балки;  $h$  - її товщина;  $M = PL/2$  - згинальний момент від прикладеного зусилля  $P$  посередині зразка.

Формула (9) кінцева для визначення  $K_{1c}$  металу шва зварного з'єднання, коли цей шов і тріщина в ньому перпендикулярно розташовані до основи зразка-балки.

**Висновки.** Аналіз запропонованих методик визначення КІН згідно із схемами консольного та триточкового згинів балкових зразків із боковою тріщиною у матеріалі основи зразка або шва зварного з'єднання, відповідно є ефективними інструментами ранжування міцності конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань у виготовленні деталей робочих елементів подрібнювальних машин.

#### Бібліографічний список

1. Андрейків О. Є. Розрахункові моделі росту втомних тріщин у металевих матеріалах за дії силових і фізико-хімічних чинників. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. Львів, 2018. № 4. С. 21–30.
2. Буртак В. В. Оцінка ударно-втомної міцності конструкційних матеріалів, що використовуються для виготовлення робочих елементів подрібнювального обладнання. *Вісник Львівського державного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2010. № 14. С. 388–393.
3. Буртак В. В., Кохана Т. М., Гуменюк Р. В., Шеремета Р. Б. Модернізація та аналіз роботи дробарок зернових продуктів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 124–128.
4. Божидарнік В. В., Андрейків О. Є., Сулим Г. Т. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів. Т. 1. Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. Луцьк: Надстир'я, 2007. 400 с.
5. Ванкевич П. І., Буртак В. В. Технічна діагностика подрібнювальних переробних машин. *Вісник Львівського державного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2002. № 6. С. 233–239.
6. Караїм В. С., Когут М. С. Установка для ударно-втомних випробувань балкових зразків згином на консолі. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні: Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2001. Вип. 422. С. 56–61.
7. Коруняк П. С., Семкович О. Д., Лозовий І. С. Розвиток засобів ударного подрібнення матеріалу. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні. Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2002. № 442. С. 61–66.
8. Когут М. С., Лебідь Н. М. Тріщиноотривкість конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань. *Праці 2-го Міжнародного симпозиуму «Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій»*. Львів-Дубляни, 1996. С. 321–324.
9. Когут М. С., Громко Я. А., Лебідь Н. М. Оцінка міцності стикових зварних з'єднань за силовим  $K_{1c}$  критерієм тріщиноотривкості на малогабаритних зразках з наплавками. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2004. Т. 9, № 1. С. 10–15.
10. Когут М. С., Лебідь Н. М. Тріщиноотривкість конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань із наплавками. Львів: Арал, 2008.
11. Когут М. С. Методи оцінки тріщиноотривкості конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань в умовах крихкого і квазікрихкого руйнування: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Львів, 1994. 340 с.
12. Лебідь Н. М. Методика визначення характеристик тріщиноотривкості матеріалу в рамках деформаційних моделей. *Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. Вісник ДУ «Львівська політехніка»*. 1999. Вип. 371. С. 106–112.
13. Панько І. М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиноотривкості матеріалів і елементів конструкцій. Львів: ЛНУ ім. Ів. Франка, 2000. 280 с.
14. Павловський М. А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 510 с.
15. Технічна діагностика матеріалів і елементів конструкцій: довідн. посібник у 8-ми т. / За заг. ред. акад. З.Т. Назарчука. Т. 8.: Методи оцінювання залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю / Андрейків О.Є., Пустовий В.М., Рудавський Д.В., Долінська І.Я., Семенов П.О. Львів: «Простір-М», 2017.

Стаття надійшла 20.02.2025