

УДК 539.3



В. П. Раківненко



О. М. Кириченко

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА НАЯВНОСТІ В НИХ ТРІЩИН

У статті розглядається інженерний метод визначення критичного напружено-деформованого стану елементів конструкцій військової техніки та озброєння як складових їх боєздатності за наявності в них пошкоджень у вигляді тріщин. Працездатність військового об'єкта оцінюється величиною коефіцієнтів інтенсивності напружень від зовнішнього навантаження, визначених із енергетичного балансу в зоні утворення тріщини.

К л ю ч о в і с л о в а: несуча здатність, метод енергетичного балансу, коефіцієнт інтенсивності напружень, тріщина.

Постановка проблеми. Досвід проведення бойових операцій Збройними Силами України та підрозділами Національної гвардії України проти агресора свідчить про безперечну необхідність підтримувати всі види озброєння та бойової техніки в повній готовності і придатності для успішного виконання бойових завдань.

Проте будь-яке озброєння та автобронетехніка внаслідок бойового застосування отримують різного роду механічні uszkodження.

У разі знакозмінних навантажень, наприклад, автоматичної зброї, характерним uszkodженням є поява тріщин з тенденцією їх лавинного розростання, після чого відбувається руйнування конструкції під дією навіть незначних знавантажень.

Основною причиною такого руйнування є наявність первинних дефектів будови матеріалу: мікропор та мікротріщин, які виникли задовго до повного руйнування матеріалу.

Тріщини можуть бути технологічними, що виникають при литті, куванні, зварюванні, а також надбаними – при монтажі об'єкта або під час експлуатації (від перевантаження) чи ведення бойових дій.

Вплив тріщини на працездатність деталі залежить від виду навантаження (статичне, знакозмінне і динамічне), від типу деформації (розтяг-стиск, зсув, згин, кручення), а також від фізико-механічних характеристик матеріалу і геометрії об'єкта.

Практика свідчить, що наявність тріщини ще не означає втрату несучої здатності конструкції. До критичного розміру тріщини uszkodження може бути безпечним, якщо є можливість виявляти і відслідковувати розвиток дефекту, що може бути обґрунтованим можливістю подальшої експлуатації коштовного об'єкта, тим більше, що процес руйнування може бути пролонгованим у часі. Цей факт є особливо важливим, коли відбуваються бойові дії, і боєздатність техніки та озброєння повинна бути прогнозованою.

Встановлення рівня відповідності об'єктів вказаним вимогам і складає проблему, що розглядається в статті. Тому фахівцям-практикам необхідно бути обізнаними в цих питаннях, хоча б у межах методики, яка подана у даній праці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задача прогнозування втомленої міцності матеріалів була і залишається актуальною протягом століття. В результаті досліджень, виконаних в області механіки руйнування закордонними вченими А. Гріффітсем, Е. Орованом, Дж. Ірвіним та вітчизняними науковцями С. В. Серенсенем, Б. Я. Кантором, Ю. І. Кудишиним, В. В. Панасюком, Е. М. Морозовим та іншими, механіка руйнування досягла високого рівня розвитку і пропонує різні методи розв'язання інженерних задач щодо розрахунку на міцність деталей з тріщинами.

Більшість дослідників з цього питання використовували відомі теорії міцності [2–5], недоліком яких є неспроможність повністю пояснити негативний вплив тріщини на зниження працездатності елементів конструкцій. Найбільш ефективною виявилася енергетична, четверта теорія міцності, згідно з якою на основі механіки пружного суцільного середовища англійський вчений А. Гріффітс розробив теорію руйнування крихкого матеріалу, який мав тріщину [1].

Метою статі є аналітичне визначення енергетичним методом критичного стану елемента конструкції з погляду на його працездатність через коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН), які є чисельною характеристикою тріщиностійкості матеріалу, та прогнозування можливості використання військового об'єкта з пошкодженням у бойових діях.

Викладення основного матеріалу. Відомо, що пружні тіла в процесі деформації накопичують потенціал механічної енергії, якої вони прагнуть позбутися через принцип мінімуму стабільного енергетичного поля.

Поверхні твердого тіла як об'єкта існування притаманна сила поверхневого натягіння, внаслідок чого вона при деформації акумулює механічну енергію.

Для рідини цей ефект наочний, а для твердого тіла не очевидний. Тверді тіла достатньо жорсткі щодо деформації зсуву, тому їх форма суттєво не зміниться під дією сил поверхневого натягіння.

Розглянемо сутність енергетичного підходу до аналізу тріщиностійкості матеріалу. Маємо тонку пластину постійної товщини δ в одноосному полі розтягуючих напружень σ . Матеріал пластини крихкий, але підпорядковується закону Гука аж до моменту руйнування.

Припустимо виникнення в ній з будь-якої причини наскрізної гострокінцевої тріщини довжиною $2l$ і перпендикулярної до осі навантаження (рис. 1).

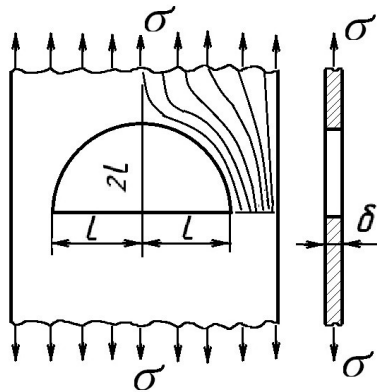


Рисунок 1 – Графічне зображення тріщини і силового поля

Краї тріщини як поверхні зазвичай звільнені від дії нормальних напружень σ . У силовому полі навколо тріщини виявилася зона розвантаження у вигляді еліпса з півосями l і $2l$, де напруження зменшуються до нуля [2]. Площа еліпса буде $S = \pi \cdot a \cdot b = 2 \cdot \pi \cdot l^2$, а об'єм зони розвантаження $V = S \cdot \delta = 2 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \delta$. Цей об'єм у пластині виявився вільним від пружної енергії за будь-якого напруження σ .

За теоремою Клапейрона питому енергію деформації запишемо як $u = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E}$, де E – модуль Юнга.

Тоді енергія, що звільниться в зоні розвантаження, буде

$$U_{зв} = u \cdot v = \frac{\sigma^2}{2 \cdot E} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l^2 \cdot \delta = \pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l^2 \cdot \delta. \quad (1)$$

Вона не може зникнути без сліду. В межах локального енергетичного балансу в зоні тріщини вона акумулюється поверхнями країв самої тріщини.

Частина акумульованої енергії витрачається на поверхневе натягіння країв тріщини у вигляді [3]

$$U_{nn} = f \cdot \chi = 4 \cdot l \cdot \delta \cdot \chi, \quad (2)$$

де $f = 4 \cdot l \cdot \delta$ – площа країв тріщини;

χ – питома енергія натягіння поверхонь країв.

Без урахування можливої дисипації енергії можна записати рівняння

$$U(l) = -U_{zg} + U_{nn} = -\pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l^2 \cdot \delta + 4 \cdot l \cdot \delta \cdot \chi \quad (3)$$

Оскільки перехід у критичний стан стійкого розвитку тріщини супроводжується мінімальним поглинанням енергії, критичну довжину тріщини l_c знайдемо з мінімуму функціонала (3) по l :

$$\frac{\partial U(l)}{\partial l} = -2 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot l \cdot \delta + 4 \cdot \delta \cdot \chi = 0,$$

звідкіля

$$l_c = \frac{2 \cdot \chi \cdot E}{\pi \cdot \sigma^2}. \quad (4)$$

Критичній довжині тріщини l_c відповідає критичне значення напруження

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi \cdot E}{\pi \cdot l_c}}. \quad (5)$$

Таким чином, чим менше значення σ_c , тим більша критична довжина l_c . За меншої початкової довжини тріщини l можуть реалізовуватися більші напруження σ_c без збільшення самої тріщини. Саме з цієї причини реальні матеріали мають певний запас міцності, не зважаючи на наявність у них тріщин та інших дефектів [4] (рис. 2).

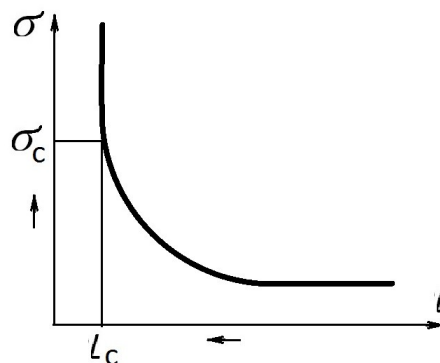


Рисунок 2 – Залежність міцності матеріалу від довжини тріщини

З вище наведеного випливає, що задача тріщиностійкості має складне аналітичне рішення внаслідок складності визначення параметра χ , який відомий для конструкційних матеріалів лише на рівні порядку їх величин [6].

Слід урахувати той факт, що в більшості своїй конструкційні матеріали в критичному стані деформування набувають пластичних властивостей ($\sigma_{np} < \sigma_c \leq \sigma_T$) у зонах концентрації напружень – на кінцях тріщини.

Хоча теорія А. Гріффітса стосується лише крихких матеріалів, американський вчений Е. Орован [8] у 1950 році запропонував урахувати пластичну роботу поверхньої тріщини в рамках теорії А. Гріффітса, надавши поверхневій енергії χ більш широкого змісту і подавши її як суму

$$\chi = \chi_{кр} + \chi_{пл}, \quad (6)$$

де $\chi_{кр}$ – питома енергія крихкої фази деформації;

$\chi_{пл}$ – питома енергія пластичної фази деформації.

У цьому і полягає концепція квазікрихкості критичного стану деформованого тіла. Вона відображає реальну поведінку матеріалів.

Експериментально встановлено [8], що пластична деформація поверхневого шара тіла $\chi_{пл}$ на три порядки перевищує величину $\chi_{кр}$. Тому останньою можна знехтувати і формулу (5) записати у вигляді

$$\chi = \chi_{пл}. \quad (7)$$

Рівняння (4) можна також записати в еквівалентній формі [7], розділивши параметри за категоріями через коефіцієнт інтенсивності напружень K :

$$\sqrt{\pi \cdot l} \cdot \sigma \leq \sqrt{2 \cdot \chi \cdot E}$$

або

$$K = \sqrt{\pi \cdot l} \cdot \sigma \leq K_c = \sqrt{2 \cdot \chi \cdot E}. \quad (8)$$

Коефіцієнт K , ліва частина рівняння (8), відображає «силовий критерій» критичного стану – геометричний фактор (розмір тріщини l) і механічний фактор (напруження σ).

Щодо правої частини рівняння (8), то коефіцієнт K_c пов'язаний з «в'язким руйнуванням». Він є чисельною характеристикою тріщиностійкості матеріалу.

Відомо, що в'язкість властива складному неоднорідному матеріалу, який гальмує розвиток тріщини, тоді як однорідний матеріал, будучи крихким, є менш тріщиностійким [9].

Умова (8) достатньо надійний критерій оцінки тріщиностійкості матеріалу, оскільки загроза появи критичного стану деталі з тріщиною описується інтенсивністю поля напружень σ у вершинах тріщини, а початок швидкого розвитку тріщини визначається умовою $K \geq K_c$.

Висновки

Наявність ефективних методів визначення величин K_c з наданням їм унормованого статусу для різних матеріалів і умов навантаження можна вважати передумовою для розрахунку конструкцій на тріщиностійкість в межах коефіцієнта інтенсивності напружень в порядку задоволення нерівності (8) із знанням властивостей матеріалу елемента конструкції, його геометрії та виду навантаження.

Запропонований метод дає можливість через співвідношення коефіцієнтів напруження за наявності тріщини визнати конструкцію певною мірою або непрацездатною, або такою, у якій процес руйнування може бути пролонгованим у часі. Останнє посилення має на увазі екстремальні умови застосування техніки та озброєння, наприклад, коли підрозділи ВСУ та НГУ ведуть бойові дії проти агресора, і пролонгування працездатності пошкодженого бойового об'єкта може бути вирішальним для досягнення успіху.

Оскільки ці положення не набули ще достатнього розвитку, в подальшому вони можуть бути темою ґрунтовного дослідження.

Перелік джерел посилання

1. Griffith A. A. The phenomener of rapture and flow in solids, Phil. Trans Roy Soc. A 221, 1920. Pp. 163–168.

2. Мигунов В. Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом образования продольных трещин. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2009. № 11–12. С. 101–107.
3. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев : Наук. думка, 1968. 246 с.
4. Панасюк В. В. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами. Киев : Наук. думка, 1991. 172 с.
5. Кириченко О. М., Раківненко В. П. Опір матеріалів : навч. посіб. Харків : НА НГУ, 2016. С. 102–108.
6. Irwin G. R. Fracture dynamics. «Fracture of Metals», ASM, Cleveland, 1948. Pp. 149–166.
7. Кантор В. Я., Стрельникова Е. А. Гиперсингулярные уравнения в задачах механики сплошной среды. Харьков : Нове слово, 2005. 252 с.
8. Orowan E. O. Fundamental of brittle behavior of metals, «Fatigue and Fracture of Metals». Wiley. New York, 1950. Pp. 139–167.
9. Кудишин Ю. И., Дробот Д. Ю. Живучесть конструкций в аварийных состояниях. *Металлические здания*. 2008. № 5. С. 21–23.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2022 р.

UDC 539.3

V. Rakivnenko, O. Kyrychenko

STUDY OF THE PERFORMANCE OF METAL STRUCTURES IN THE PRESENCE OF CRACKS IN THEM

The article discusses the urgent problem of the bearing capacity of structural elements that have defects in the form of cracks, which negatively affects the performance of the object. There is premature, sometimes sudden destruction even under the action of minor loads, cracks can be technological: occur during casting, forging, welding, as well as acquired; during installation of the object or operation (from overload), the occurrence of cracks also depends on the type of load: static, alternating and dynamic; from the type of deformation: tensile-compression, displacement, torsion, bending, as well as from the physical and mechanical characteristics of the material and the geometry of the object. Practice shows that the presence of a crack does not mean the loss of the bearing capacity of the structure: up to the critical size of the crack, damage can be safe if it is possible to detect and track the development of a defect, which will be the justification for the further operation of the valuable object.

Taking into account the complexity of the problem under consideration, the solution is carried out by the method of energy balance. Its essence is as follows. Elastic bodies in the process of deformation accumulate the potential of mechanical energy. It cannot disappear without a trace, and in the presence of a crack, it accumulates on the surfaces of its banks, more precisely in the deformation of the tension of these banks, leading to the development of a crack. The critical state of crack resistance is determined by the ratio between the intensity coefficients of stresses (K_{IN}), which reflect the size of the crack and the acting stresses. In this case, the design will be inoperable, or such that the process of destruction can be prolonged in time.

К е у в о р д с : performance, energy balance method, stress intensity coefficient, crack.

Раківненко Валерія Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0002-6136-6191>

Кириченко Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0001-9136-7593>