



УДК 624.015:624.023



**МАТЧЕНКО Т.І.**

Канд. технічних наук, провідний інженер, ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «ЕНЕРГОПРОЕКТ», м. Київ, Україна, e-mail: t.matchenko@kiep.kiev.ua, тел. +38 (097) 594-48-05, ORCID: 0000-0002-0999-7412



**ШАМИС А.Б.**

Начальник відділу, ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «ЕНЕРГОПРОЕКТ», м. Київ, Україна, e-mail: shamis@kiep.kiev.ua, тел. +38 (095) 270-76-30



**ПЕРВУШОВА Л.Ф.**

Інженер I категорії, ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «ЕНЕРГОПРОЕКТ», м. Київ Україна, e-mail: l.pervushova@kiep.kiev.ua, тел. +38 (044) 239-81-75



**МАТЧЕНКО П.Т.**

Мол. науковий співробітник, Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ Україна, e-mail: match@ukr.net, тел. +38 (098) 648-62-36

## ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ КОМБІНОВАНИХ ІЗ СТАЛІ ТА ЗАЛІЗОБЕТОНУ КОНСТРУКЦІЙ З ТРІЩИНАМИ В СТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТАХ

### АНОТАЦІЯ

**Вступ.** Упродовж експлуатації в сталевих елементах конструкцій накопичуються корозійні виразки, тріщини від втоми та інші пошкодження. Вони можуть стати джерелом виникнення магістральних тріщин, що спричиняють руйнування конструкцій. На сьогодні в державних будівельних нормах України відсутні рекомендації щодо виконання перевірочних розрахунків на циклічну тріщиностійкість та опір крихкому руйнуванню існуючих елементів сталевих конструкцій з тріщинами.

**Мета роботи** – розробити розрахунки опору крихкому руйнуванню сталезалізобетонних конструкцій з тріщинами в сталевих елементах.

**Результати розрахунків.** У статті представлено формули для виконання перевірочних розрахунків на опір крихкому руйнуванню сталевих елементів із тріщинами. Ці розрахунки можуть бути застосовані для обґрунтування надійності існуючих комбінованих сталезалізобетонних конструкцій мостів.

**Висновки.** Визначено розрахунковим методом опір крихкому руйнуванню сталевих елементів із тріщинами існуючих комбінованих сталезалізобетонних конструкцій мостів.

Отримані розрахунки можуть бути застосовані

для визначення можливості подальшої експлуатації існуючих мостів із комбінованими сталезалізобетонними конструкціями.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** комбіновані конструкції, опір руйнуванню, крихке руйнування, тріщини, сталезалізобетонні конструкції.

### СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗ СТАЛИ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНАМИ В СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

**МАТЧЕНКО Т.И.** Канд. технических наук, ведущий инженер, ПАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «ЭНЕРГОПРОЕКТ», г. Киев, Украина, e-mail: t.matchenko@kiep.kiev.ua, тел. +38 (097) 594-48-05, ORCID:0000-0002-0999-7412

**ШАМИС А.Б.** Начальник отдела, ПАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «ЭНЕРГОПРОЕКТ», г. Киев, Украина, e-mail: shamis@kiep.kiev.ua, тел. +38 (095) 270-76-30



**ПЕРВУШОВА Л.Ф.** Инженер I категории, ПАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «ЭНЕРГОПРОЕКТ»,

г. Киев, Украина,  
e-mail: l.pervushova@kiep.kiev.ua,  
тел. +38 (044) 239-81-75

**МАТЧЕНКО П.Т.** Мл. научный сотрудник, Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Киев, Украина  
e-mail: match@ukr.net,  
тел. +38 (098) 648-62-36

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе эксплуатации в стальных элементах конструкций накапливаются коррозионные язвы, трещины от усталости и другие повреждения. Они могут стать источником образования магистральных трещин, которые вызывают разрушения конструкций. На сегодня в строительных нормах Украины отсутствуют рекомендации по выполнению проверочных расчетов на стойкость к циклическому росту трещин и сопротивление хрупкому разрушению существующих элементов стальных конструкций с трещинами.

**Цель.** Цель данной работы – разработка расчетов на сопротивление хрупкому разрушению сталежелезобетонных конструкций с трещинами в стальных элементах.

**Результаты расчетов.** Работа посвящена решению этой задачи. В статье приведены формулы для выполнения проверочных расчетов на сопротивление хрупкому разрушению стальных элементов с трещинами. Эти расчеты могут быть применены для обоснования надежности существующих комбинированных сталежелезобетонных конструкций мостов.

**Выводы.** Расчетным методом определено сопротивление хрупкому разрушению стальных элементов с трещинами существующих комбинированных сталежелезобетонных конструкций мостов.

Полученные расчеты могут быть применены для определения возможности дальнейшей эксплуатации существующих мостов с комбинированными сталежелезобетонными конструкциями.  
**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** комбинированные конструкции, сопротивление разрушению, хрупкое разрушение, трещины, сталежелезобетонные конструкции.

## BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF COMBINED STEEL AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH CRACKS IN STEEL ELEMENTS

**MATCHENKO T.I.** PhD, lead engineer, PJSC "Kiev Research and Design Institute "ENERGOPROEKT", Kyiv, Ukraine,

e-mail: t.matchenko@kiep.kiev.ua,  
tel. +38 (097) 594-48-05,  
ORCID:0000-0002-0999-7412

**SHAMIS L.B.** Head of the department, PJSC "Kiev Research and Design Institute "ENERGOPROEKT", Kyiv, Ukraine,  
e-mail: shamis@kiep.kiev.ua,  
tel. +38 (095) 270-76-30

**PERVUSHOVA L.F.** First category engineer, PJSC "Kiev Research and Design Institute "ENERGOPROEKT", Kyiv, Ukraine,  
e-mail: t.matchenko@kiep.kiev.ua,  
tel. +38 (044) 239-81-75

**MATCHENKO P.T.** Junior stientst, State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, Ukraine,  
e-mail: t.matchenko@kiep.kiev.ua,  
tel. +38 (098) 648-62-36

## ABSTRACT

**Introduction.** In the course of operation, corrosion pits, fatigue cracks and other damages accumulate in steel structural elements. They can become a source of the main crack formation. Cracks can cause the destruction of structures. To date, the state construction codes of Ukraine do not have formulas for performing the verification calculations on low cycle fatigue, and resistance to cyclic crack growth and brittle fractures of the existing elements of steel structures with cracks.

**Goal.** The purpose of this paper is the development of calculations on resistance to brittle fracture of steel-reinforced concrete structures with cracks in steel elements, which in future can be used to finalize the revision of the document «Bridges and pipes. Reinforced concrete structures. Design rules».

**Calculated dependences.** To perform the practical verification calculations on resistance to the cracks cyclic growth and resistance to brittle fracture, it is necessary to have the values of the critical stress intensity factors of structural steels with cracks. The authors of this paper have prepared a number of publications to solve this problem. The paper contains links to publications, in which the characteristic (normative) values of the critical stress intensity factors for structural steels with cracks are given. In the paper, formulas are given for performing the verification calculations on the brittle fracture resistance of steel elements with cracks. These formulas can be applied to the existing combined steel-reinforced concrete bridge structures.

**Conclusion.** The brittle fracture resistance of steel elements with cracks in existing combined steel-concrete bridge structures is measured by the calculation method. The calculations can be applied to determine the possibility of the further operation of existing bridges with combined steel-reinforced concrete structures.



**KEY WORDS:** combined structures, brittle fracture resistance, brittle fracture.

## ВСТУП

В конструкціях мостів часто застосовують сталезалізобетонні конструкції, елементи яких представлено на рис. 1.

При низьких температурах експлуатації, циклічних та динамічних навантаженнях у сталевих елементах утворюються тріщини. В нормативних документах України та в Європейських нормах відсутні рекомендації щодо перевірки міцності сталезалізобетонних конструкцій з тріщинами в сталевих елементах. Тому розвиток методів розрахунку сталезалізобетонних конструкцій з тріщинами в сталевих елементах на циклічну тріщиностійкість та на опір крихкому руйнуванню є актуальним.

## МЕТА

Мета роботи – розробити розрахунки опору крихкому руйнуванню сталезалізобетонних конструкцій з тріщинами в сталевих елементах, що дозволить виконувати розрахункове обґрунтування існуючих комбінованих конструкцій мостів із тріщинами в сталевих елементах.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У сталевих конструкціях можуть виникати та

зростати тріщини (рис. 2). Різновиди тріщин представлено на рис. 3.

Опір крихкому руйнуванню сталевих елементів з тріщиною сталезалізобетонної конструкції визначаємо за формулами:

$$\frac{K_I \cdot \gamma_n}{[K_{IC}] \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

$$\frac{K_{II} \cdot \gamma_n}{[K_{IIC}] \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (2)$$

$$\frac{K_{III} \cdot \gamma_n}{[K_{IIIC}] \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (3)$$

$$\sqrt{\left(\frac{K_I \cdot \gamma_n}{[K_{IC}] \cdot \gamma_c}\right)^2 + \left(\frac{K_{II} \cdot \gamma_n}{[K_{IIC}] \cdot \gamma_c}\right)^2 + \left(\frac{K_{III} \cdot \gamma_n}{[K_{IIIC}] \cdot \gamma_c}\right)^2} \leq 1, \quad (4)$$

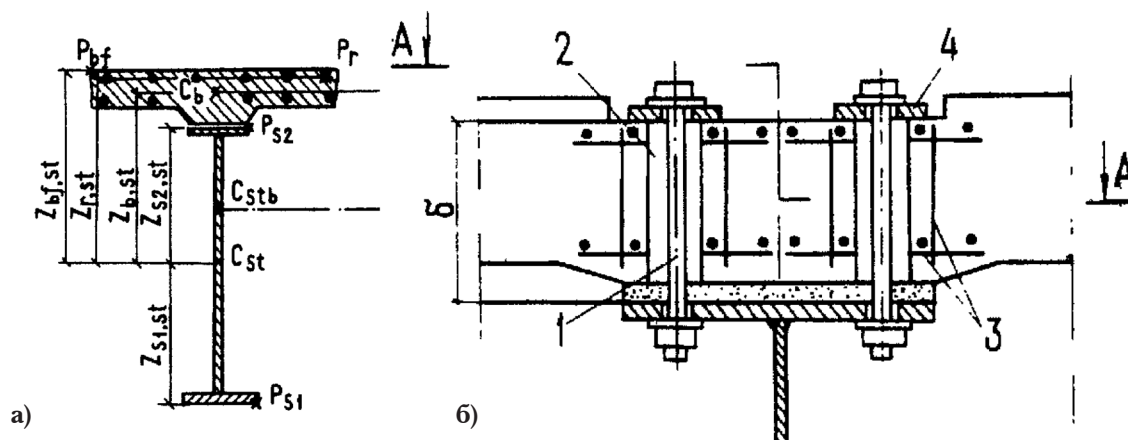
де:

$\gamma_c$  - коефіцієнт умов роботи;

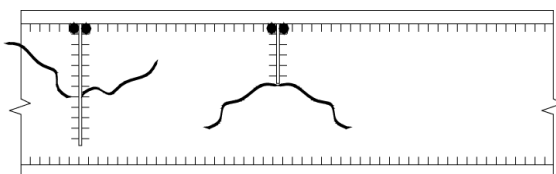
$\gamma_n$  - коефіцієнт надійності за відповідальністю, приймають за вимогами [1];

$K_I, K_{II}, K_{III}$  - коефіцієнти інтенсивності напружень відповідно нормального відриву, поперечного зсуву, поздовжнього зсуву у відповідності до рис. 3, МПа $\times$ (м)<sup>0.5</sup>;

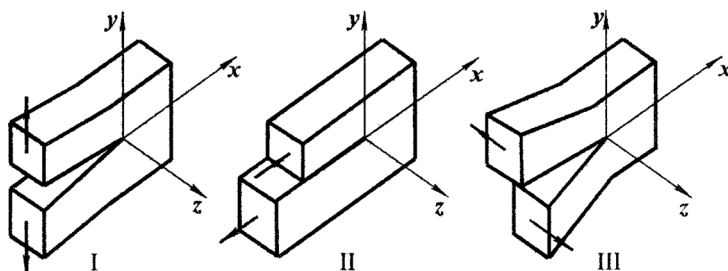
$[K_{IC}]$  - критичне значення коефіцієнта



**Рис. 1.** Сталезалізобетонні конструкції: а) розрахункова схема сталезалізобетонної конструкції; б) болтове з'єднання сталезалізобетонної конструкції. 1- болти або шпильки; 2 – муфти; 3 – арматурні каркаси; 4 – сталеві листи



**Рис. 2.** Пошкодження в балках у вигляді тріщин



**Рис. 3.** Різновиди переміщення берегів тріщин і різновиди руйнувань: I - нормальний відрив, II - поперечний зсув, III - поздовжній зсув



інтенсивності напружень нормального відриву,  $\text{МПа} \times (\text{м})^{0.5}$ ;

$[K_{II}]$  – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень поперечного зсуву,  $\text{МПа} \times (\text{м})^{0.5}$ ;

$[K_{III}]$  – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень поздовжнього зсуву у відповідності до рис. 3,  $\text{МПа} \times (\text{м})^{0.5}$ . Розрахунок зварних з'єднань сталевих конструкцій, що відносяться до першої та другої груп за можливістю крихкого та в'язкого руйнування, визначають за [2].

Критичні значення коефіцієнтів інтенсивності напружень арматурних сталей представлені в [3]. Критичні значення коефіцієнтів інтенсивності напружень для болтових з'єднань і з'єднань на шпильках приведені в [4]. Критичні значення коефіцієнтів інтенсивності напружень для прокату з труб представлені в [5].

Коефіцієнти інтенсивності напружень  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  для точки, що досліджується, визначаються за формулами:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi L} \cdot Y_I, \quad (5)$$

$$K_{II} = \tau \cdot \sqrt{\pi L} \cdot Y_{II}, \quad (6)$$

$$K_{III} = \tau \cdot \sqrt{\pi L} \cdot Y_{III}, \quad (7)$$

де

$L$  – довжина тріщини в розтягнутому волокні елемента сталеві конструкції, м;

$\sigma$ ,  $\tau$  – відповідно нормальні і дотичні напруження в точці конструкції, що досліджується, за умови, що тріщина відсутня, МПа;

$Y_I$ ,  $Y_{II}$ ,  $Y_{III}$  – функції форми елемента сталеві конструкції та орієнтації тріщини.

За умовну точку, що досліджується, приймаємо точку кінчика тріщини.

Коефіцієнти інтенсивності напружень  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  визначаємо за формулами:

$$K_I = \sqrt{\frac{G_I \cdot E}{(1-\nu^2)}}, \quad (8)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{G_{II} \cdot E}{(1-\nu^2)}}, \quad (9)$$

$$K_{III} = \sqrt{\frac{G_{III} \cdot E}{(1-\nu^2)}}, \quad (10)$$

де:

$G_I$ ,  $G_{II}$ ,  $G_{III}$  – швидкості зміни енергії деформації елемента конструкції при прирощенні тріщини, відповідно нормального відриву, поперечного і поздовжнього зсуву,  $\text{МДж/м}^2$ ;

$E$ ,  $\nu$  – відповідно модуль пружності і коефіцієнт Пуассона сталі, МПа, долі від одиниці.

Параметри  $G_I$ ,  $G_{II}$ ,  $G_{III}$  визначають за формулами:

$$G_I = \frac{U_{1(I)} - U_{2(I)}}{b \cdot (L_1 - L_2)}, \quad (11)$$

$$G_{II} = \frac{U_{1(II)} - U_{2(II)}}{b \cdot (L_1 - L_2)}, \quad (12)$$

$$G_{III} = \frac{U_{1(III)} - U_{2(III)}}{b \cdot (L_1 - L_2)}, \quad (13)$$

де:

$L_1$ ,  $L_2$  – дві, приблизно однакові довжини однієї тріщини шириною 1 м у сталевому елементі конструкції, м;

$b$  – умовна ширина елемента, що дорівнює 1 м;

$U_{1(I)}$ ,  $U_{2(I)}$  – частини енергії деформації сталеві конструкції з тріщиною, що відповідають складовим частинам компонентів тензорів напруження і деформацій, що симетричні до поверхні тріщини, (рис. 3), відповідно для конструкції з тріщиною довжиною  $L_1$  і для конструкції з тріщиною довжиною  $L_2$ , Дж;

$U_{1(II)}$ ,  $U_{2(II)}$  – частини енергії деформації сталеві конструкції з тріщиною, що відповідають складовим частинам компонентів тензорів напруження і деформацій, що косо симетричні до поверхні тріщини (в площині X-Z) (рис. 3), відповідно для конструкції з тріщиною довжиною  $L_1$  і для конструкції з тріщиною довжиною  $L_2$ , Дж;

$U_{1(III)}$ ,  $U_{2(III)}$  – частини енергії деформації сталеві конструкції з тріщиною, що відповідають складовим частинам компонентів тензорів напруження і деформацій, що косо симетричні до поверхні тріщини (в площині X-Y) (рис. 3), відповідно для конструкції з тріщиною довжиною  $L_1$  і для конструкції з тріщиною довжиною  $L_2$ , Дж.

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню сталезалізобетонних перерізів балок із тріщинами в розтягнутому волокні сталеві елемента у розрахункових перерізах 1-го класу необхідно виконувати за формулами:

- при дії моменту  $M(t)$  в одній з головних площин

$$\frac{\gamma_n \times M(t) \times 1,12 \times (\pi \times L)^{1/2}}{W_{n,min} \times [K_{IC}] \times \gamma_c} \leq 1; \quad (14)$$

- при дії поперечної сили  $Q(t)$ , що спрямована паралельно серединній площині стінки з тріщинами

$$\frac{\gamma_n \times Q(t) \times S \times (1 - \omega(t)_s) \times 1,12 \times (\pi \times L)^{1/2}}{I \times t_w \times [K_{III}] \times \gamma_c} \leq 1, \quad (15)$$

де

$x$  і  $y$  – відстані від головних осей інерції до розглядуваної точки перерізу;





$W_{n,min}$  - найменший опір згинальному моменту сталезалізобетонного перерізу,  $m^3$ ;

$t_w$  - товщина прокату, м.

Характеристичні значення і правила визначення розрахункових значень критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень ( $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$ ,  $K_{IIIC}$ ) для зварних з'єднань елементів приведені в [6, 7].

Отримані розрахунки можуть бути застосовані для визначення можливості подальшої експлуатації існуючих мостів з комбінованими сталезалізобетонними конструкціями, що мають пошкодження у вигляді тріщин.

## ВИСНОВКИ

1. Визначено розрахунковим методом опір крихкому руйнуванню сталевих елементів із тріщинами існуючих комбінованих сталезалізобетонних конструкцій мостів.
2. Отримані розрахунки можуть бути застосовані для визначення можливості подальшої експлуатації існуючих мостів з комбінованими сталезалізобетонними конструкціями.
3. Отримані розрахунки можуть бути використані при опрацюванні пропозицій до нової редакції державних будівельних норм ДБН В.2.3-14:2006 «Споруди транспорту. Мости і труби. Правила проектування».

## ЛІТЕРАТУРА

1. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14:2009. – [Чинні з 2009-12-01]. – Київ: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 37 с. – (Державні буд. норми України).
2. Матченко П.Т. Розрахунок зварних з'єднань сталевих конструкцій, що відносяться до першої та другої груп за можливістю крихкого та в'язкого руйнування / П.Т. Матченко // Буд-во України, 2017. - № 1. - С. 27-34.
3. Матченко П.Т. Методика розрахунку втоми бетону, звичайної і попередньо напруженої арматури за ДБН В.2.6-98 і ДСТУ Б В.2.6-145 / Матченко П.Т. // Буд-во України, 2012. - № 1. - С. 18-23.
4. Шаміс Л.Б. Розрахунок болтових з'єднань на циклічну тріщиностійкість і крихку міцність / Л.Б. Шаміс // Буд-во України, 2016. - № 1. - С. 27-34.
5. Матченко Т.І. Розрахунок на статичну міцність, опір крихкому руйнуванню та циклічну тріщиностійкість сталевих трубопроводів АЕС, не важливих для безпеки / Т.І. Матченко, Л.Б. Шаміс,

Л.Ф. Первушова // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, 2015, вип. 25. - С. 15-24.

6. Матченко Т.І. Розрахунок елементів сталевих конструкцій, що знаходяться в експлуатації, на статичну міцність і опір крихкому руйнуванню / Т.І. Матченко // Наука та буд-во, 2016, № 2(8). - С. 28-34.
7. Матченко Т.І. Розрахунок зварних елементів сталевих конструкцій на витривалість і циклічну тріщиностійкість / Т.І. Матченко, Л.Б. Шаміс, П.Т. Матченко // Буд-во України, 2015. - № 1. - С. 37-44.

## REFERENCES

1. Basic principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, facilities, building structures and bases. (2009). DBN V.1.2-14-2009. Kyiv: SE «Ukrarkhbuildinform».
2. Matchenko, T.I. (2017). Calculation of the welded joints of steel structures belonging to the first and second groups by the possibility of brittle and ductile fracture. Collection of scientific papers: Building manufacture, 61, 65-72.
3. Matchenko, T.I. (2012). The method of the fatigue calculation for concrete and normal and prestressed reinforcement according to DBN V.2.6-98 and DSTU B V.2.6-145. Construction of Ukraine, 1, 18-23.
4. Shamis, L.B. (2016). Calculation of bolting joints for the cyclic resistance to cracking and brittle strength. Construction of Ukraine, 1, 27-34.
5. Matchenko, T.I., Shamis, L.B., & Pervushova, L.F. (2015). Calculation of not safety-important NPP steel pipes for static strength, brittle fracture resistance and cyclic resistance to cracking. Problems of nuclear power plants and of Chornobyl, 25, 15 – 24.
6. Matchenko, T.I. (2016). Calculation of the steel structures elements in use for static strength and brittle fracture resistance. Science and construction, 2(8), 28-34.
7. Matchenko, T.I., Shamis, L.B., & Pervushova, L.F. (2015). Calculation of the steel structures welded elements for endurance and cyclic resistance to cracking. Construction of Ukraine, 1, 37-44.

Стаття надійшла до редакції 25.08.2017 р.