



МАТЕРІАЛИ ДРУКУЮТЬСЯ
УКРАЇНСЬКОЮ, АНГЛІЙСЬКОЮ,
ПОЛЬСЬКОЮ МОВАМИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

*XX Міжнародної науково-практичної
конференції молодих вчених, курсантів та
студентів*

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Львів – 2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Голова: Василь **ПОПОВИЧ**, проректор з наукової роботи, д.т.н., професор;

Заступники голови: Ярослав **ІЛЬЧИШИН**, начальник науково-дослідного центру, к.пед.н.;

**Члени наукового
комітету:**

Oksana TELAK, MSFS, Warsaw, Poland, Doctor of Sciences;

Jerzy TELAK, ASE, Warsaw, Poland, Doctor of Sciences, Professor;

Bogusław KOGUT, Doktor inżynier, Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej;

Вікторія СЕРГІЄНКО, проректор з наукової роботи Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького, д.м.н., професор;

Максим СМІЛЕВСЬКИЙ, начальник управління безпеки департаменту міської мобільності та вуличної інфраструктури Львівської міської ради, к.ю.н.;

Олеся ВАЩУК, професор кафедри криміналістики Національного університету «Одеська юридична академія», Голова Ради молодих учених при Міністерстві освіти і науки України, д.ю.н. професор;

Дмитро КОБИЛКІН, учений секретар Університету, к.т.н., доцент;

Анастасія СИМАХОВА, професор кафедри бізнес-аналітики та цифрової економіки Національного авіаційного університету, перший заступник Голови Ради молодих учених при Міністерстві освіти і науки України, д.е.н. професор;

Ольга БАРАБАШ, професор кафедри історії, теорії та конституційного права ННІ права та правоохоронної діяльності ЛьвДУВС, Голова Ради молодих вчених, д.ю.н., професор.

Члени оргкомітету: **Сергій ЄМЕЛЬЯНЕНКО**, заступник начальника центру – начальник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-дослідного центру, к.т.н., ст. досл.;

Роман ЯКОВЧУК, начальник факультету цивільного захисту, д.т.н., доцент;

Роман ЛАВРЕЦЬКИЙ, начальник факультету психології та соціального захисту, к.і.н., доцент;

Богдан БОЙЧУК, т.в.о. начальника факультету пожежної та техногенної безпеки, доктор філософії (PhD);

Ярослав КИРИЛІВ, провідний науковий співробітник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-дослідного центру, к.т.н., с.н.с.;

Ольга МЕНЬШИКОВА, заступник начальника факультету цивільного захисту, к.ф.-м.н., доцент;

УДК 669.788

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИН В
ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ У СЕРЕДОВИЩІ ВОДНЮ ПРИ
СКЛАДНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ***Максим Федаш***Тарас Гембара**, кандидат технічних наук, доцент
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Вплив водневого середовища на конструктивні сталі енергетичного обладнання є катастрофічно небезпечний і важливо мати дані про тріщиноутворення, розвиток тріщин, залежно від концентрації водню. Особливо проблемним з наукової точки зору є дослідження такого впливу при наявності просторових механізмів руйнування, які характерні для складного напруженого стану. Розглянуто математичне моделювання розвитку таких тріщин при складному напруженому стані.

Ключові слова: напружений стан, водень, сталь, тріщина, ріст, концентрація.

**MATHEMATICAL MODELING OF CRACK DEVELOPMENT IN
STRUCTURAL ELEMENTS IN A HYDROGEN ENVIRONMENT IN A
COMPLEX STRESSED STATE***Maksym Fedash***Taras Hembara**, Doctor Ph., Associate Professor
Lviv State University of Life Safety

The influence of hydrogen environment on structural steels of power equipment is catastrophically dangerous and it is important to have data on crack formation, crack development, depending on hydrogen concentration. Particularly problematic from a scientific point of view is the study of such influence in the presence of spatial fracture mechanisms, which are characteristic of complex stressed joints. Mathematical modeling of the development of such cracks in complex stressed states is considered.

Keywords: stressed state, hydrogen, steel, crack, growth, concentration.

Для дослідження процесу поширення тріщини у квазікрихкому тілі при складному навантаженні розглянемо наведену нескінченну пружно-пластичну пластину з тріщиною $2l$ (рис.1)

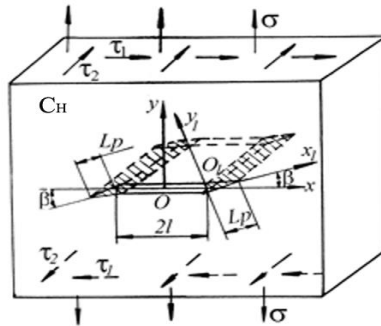


Рисунок 1. – Схема навантаження тіла з тріщиною.

На нескінченності до пластини прикладені зовнішні розтягуювальні зусилля σ , зусилля поперечного τ_1 і поздовжнього τ_2 зсувів. Отже у вершині тріщини при її навантаженні виникає складний напружений стан. Внаслідок навантаження такого тіла при досягненні гранично-рівноважного стану у вершині тріщини під кутом β підросте відросток тріщини, а на його продовженні виникне пластична зона розміром Lp , де матеріал деформований за границю течіння. Задача полягає у визначенні розмірів зони пластичності та деформацій у ній. Для цього як і у випадку відомої δ_c -моделі [1-3] пластичну зону моделюємо розрізом до берегів якого прикладені відповідні усереднені напруження σ_{01} , τ_{01} , τ_{02} . Таким чином, пружно-пластична задача зводиться до чисто пружної. Приведені міркування можна представити у вигляді наступних умов :

$$\begin{aligned} y \rightarrow \infty : \sigma_y = \sigma, \tau_{xy} = \tau_1, \tau_{yz} = \tau_2; \\ y = 0, |x| < a : \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$y = 0, a < |x| < b : \sigma_y = \sigma_{01}, \tau_{xy} = \tau_{01}, \tau_{yz} = \tau_{02};$$

де σ_{01} , τ_{01} , τ_{02} – усереднене напруження в зоні передруйнування, яке має такий самий зміст як і у δ_c -моделі для тріщини Гріффітса і знаходиться із діаграми наступним чином (рис. 2).

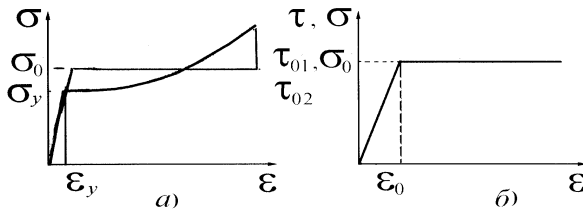


Рисунок 2. – а – реальний матеріал, б – модельний матеріал

Реальний матеріал моделюємо, ідеально пружно-пластичним з напруженням пластичності на розтяг σ_0 . Напруження σ_0 визначаються з умови рівності площ, що обмежуються кривими $\sigma(\epsilon)$, $\tau(\gamma)$ (див. рис. 2) в обох випадках модельного і реального матеріалів. Таке порівняння має і фізичне трактування - σ_{01} , τ_{01} , τ_{02} визначається з умови рівності робіт, затраченої на деформування реального і модельного тіл.

Оскільки дана задача була зведена до чисто пружної, то такий складний напружений стан можна розглядати як суперпозицію трьох напружень: станів нормального розтягу $\hat{\sigma}_1$, поперечного $\hat{\sigma}_2$ та поздовжнього $\hat{\sigma}_3$ зсувів:

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_3 \quad (2)$$

Кожен з цих напружених станів є розв'язком задачі Гріффітса для нормального розтягу, поперечного та поздовжнього зсувів відповідно. Дані напружені стани пов'язані співвідношенням (2) та враховуючи те що за змішаного руйнування тіла біля вершини тріщини формується єдина зона передруйнування Lp , то вважаємо, що виконується умова

$$Lp_I = Lp_{II} = Lp_{III} = Lp \quad (3)$$

Це пояснюється тим, що насправді пластична зона є одна. Таке розбиття задачі на три простіших вже дозволяє скористатися відомими розв'язками [1-3] для відповідних задач. В рамках лінійної механіки руйнування (припускаючи малість пластичних зон) ці розв'язки для довжин пластичних зон матимуть наступний вигляд:

$$Lp = \frac{\pi K_I^2}{8\sigma_{01}^2} = \frac{\pi K_{II}^2}{8\tau_{01}^2} = \frac{\pi K_{III}^2}{8\tau_{02}^2}, \quad (4)$$

для розкриття і зсувів у вершині тріщини

$$\delta_I = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{2E\sigma_{01}}, \quad \delta_{II} = \frac{(1-\nu^2)K_{II}^2}{2E\tau_{01}}, \quad \delta_{III} = \frac{(1-\nu^2)K_{III}^2}{2E\tau_{02}}. \quad (5)$$

Врахувавши (5) для Lp отримаємо:

$$Lp = \frac{2\pi E}{8(1-\nu^2)\sigma_{01}} \delta_I = \frac{2\pi E}{8(1-\nu^2)\tau_{01}} \delta_{II} = \frac{2\pi E}{8(1-\nu^2)\tau_{02}} \delta_{III}. \quad (6)$$

Гранично-рівноважний стан пластини з тріщиною моделюємо, як критичний стан пластини з ламаною тріщиною, на продовженні відростків, якої під кутом β до лінії тріщини розміщені зони передруйнування Lp (рис.1). Біля кінців відростків напружено-деформований стан визначається через КІН [2]

$$K_I(\beta) = K_I^* B_{I1}(\beta) + K_{II}^* B_{I2}(\beta), K_{II}(\beta) = K_I^* B_{II1}(\beta) + K_{II}^* B_{II2}(\beta), \quad (7)$$

$$K_{III}(\beta) = K_I^* B_{III1}(\beta) + K_{II}^* B_{III2}(\beta);$$

де K_I^* , K_{II}^* , K_{III}^* – КІН біля вершини тріщини без відростків.

За умову гранично-рівноважного стану розглядуваного пружно-пластичного тіла з тріщиною приймаємо умову досягнення енергією W пластичних деформацій в пластичній зоні (зоні передруйнування) критичної величини W_c , яку вважаємо для заданих умов (температура, середовище і т. д.) характеристикою тріщиностійкості матеріалу, тобто

$$W(P, L_P) / P = P_* = W_c \left(\text{або} \frac{\partial}{\partial L_P} W(P, L_P) / P = P_* = \gamma_c \right) \quad (8)$$

де $W(P, L_P)$ – енергія пружно-пластичних деформацій у зоні передруйнування, обчислена на основі δ_c -моделі [1], P – параметр пропорцій на його зростання компонентів зовнішніх напружень за умов складного навантаження; $P = P_*$ – граничне значення параметра P ; L – довжина зони передруйнування. Одержані за наявності водню за методикою [4] результати у вигляді графічної залежності представлені на рис. 3.

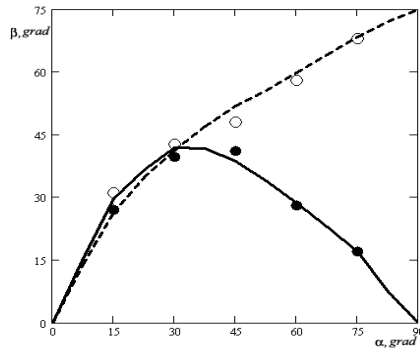


Рисунок 3. – Залежність кута початкового поширення тріщини від кута орієнтації вихідної тріщини для сталі 17Г2С: *суц. лін.* – без водню; *штрих. лін.* – з воднем; *точки* – експер. Дані

Список літератури

1. Clark W.G. Effect of Temperature and Pressure on Hydrogen Cracking in High Strength Type 4340 Steel // J. Materials for Energy Systems. – 1999. - №1. – P. 33-40.
2. Hembara O., Chepil O., Hembara T., Mochulskyi V., Sapuzhak Ya. Influence of temperature and hydrogen on fatigue fracture of 10kh15n27t3v2mr steel /

Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – Warsaw 2020 – 58, 1. – P. 3-15, DOI: 10.15632/jtam-pl/115214.

3. M. Dutkiewicz, O. Hembara, O. Chepil, M. Hrynenko and T. Hembara. A New Energy Approach to Predicting Fracture Resistance in Metals // Materials (Basel, Switzerland), 2023. -16, 1566.

4. В. Воробець, Т. Гембара. Математичне моделювання розвитку тріщин для безпечної експлуатації елементів конструкцій у середовищі водню. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: 36. наук. праць XIX- ої Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів конференції –Львів: ЛДУ БЖД, березень 2024, С.770-774.

References

1. Clark W.G. Effect of Temperature and Pressure on Hydrogen Cracking in High Strength Type 4340 Steel // J. Materials for Energy Systems. – 1999. – No. 1. – pp. 33-40.

2. Hembara O., Chepil O., Hembara T., Mochulskyi V., Sapuzhak Ya. Influence of Temperature and Hydrogen on Fatigue Fracture of 10kh15n27f3v2mr Steel // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – Warsaw, 2020. – 58, 1. – pp. 3-15, DOI: 10.15632/jtam-pl/115214.

3. M. Dutkiewicz, O. Hembara, O. Chepil, M. Hrynenko, and T. Hembara. A New Energy Approach to Predicting Fracture Resistance in Metals // Materials (Basel, Switzerland), 2023. – 16, 1566.

4. V. Vorobets, T. Hembara. Mathematical Modeling of Crack Development for Safe Operation of Structural Elements in Hydrogen Environment. Problems and Perspectives in the Development of Life Safety Systems: Collection of Scientific Papers from the XIX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets, and Students – Lviv: Lviv State University of Life Safety, March 2024, pp. 770-774.

Світлана Стинько, ВИРОБНИЧИЙ КОНТРОЛЬ ЗА УМОВАМИ ПРАЦІ.....	580
Стефанія Денега, Лариса Руденко, ФАКТОРИ РИЗИКУ ТА ЗАХИСТУ ФОРМУВАННЯ ЕМОЦІЙНОГО ВИГОРАННЯ СЕРЕД ПОСТАЧАЛЬНИКІВ МЕДИЧНИХ ПОСЛУГ У ВОЄННИЙ ЧАС.....	584
Фульмас А.І, Ровецький І. М. СИСТЕМА ПОШУКУ ТА МОНІТОРИНГУ МЕДИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ГОСПІТАЛІВ.....	589
Юлія Пиріг, Горностаї О.Б., ВАЖЛИВІ АСПЕКТИ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ- МІЖНАРОДНИХ НОРМ З БЕЗПЕКИ ПРАЦІ В ЗАКОНОДАВСТВО УКРАЇНИ.....	592

Секція 8 / Section 8

ПРИРОДНИЧІ, БІОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Анастасія Фрис, Балицька В.О., ОПТОВОЛОКНО: ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ.....	596
Анна Чабан, Наталія Гринчишин, РОЛЬ ЕКОЛОГІЧНОГО КОНСАЛТИНГУ НА РИНКУ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОСЛУГ В УКРАЇНІ.....	601
Баць В.А., ЗАКОНОДАВЧЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ ТА ПРОБЛЕМА ЇХ УТИЛІЗАЦІЇ.....	604
Валентина Кукса, СУЧАСНІ ЕКОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ТА ШЛЯХИ ЗБЕРЕЖЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	608
Вікторія Ващук, Соломія Писаревська, Зіновій Яремко, УСВІДОМЛЕННЯ СТУДЕНТСЬКОЮ МОЛОДДЮ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВІЙНИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ.....	613

<i>Ірина Федів, Катерина Степова, ВИКОРИСТАННЯ ЦЕОЛІТІВ ТА ГЛИН ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ВІД МІЮЧИХ ЗАСОБІВ.....</i>	<i>617</i>
<i>Кирил Савчин, Наталія Гринчишин, ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ СНІГОВОГО ПОКРИВУ В КАРПАТСЬКОМУ БІОСФЕРНОМУ ЗАПОВІДНИКУ</i>	<i>621</i>
<i>Максим Рудий, Ірина Кочмар, ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ В МЕЖАХ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....</i>	<i>624</i>
<i>Максим Федаш, Тарас Гембара, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ У СЕРЕДОВИЩІ ВОДНЮ ПРИ СКЛАДНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ.....</i>	<i>628</i>
<i>Марта Труш, Чмир О.Ю., ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЙ ПАКЕТУ MAPLE ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПРО РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ.....</i>	<i>633</i>
<i>Мар'ян Воробець, Уляна Хром'як, ВОДНЕВИЙ ПОКАЗНИК (рН) ВОДИ У М. ВИННИКИ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....</i>	<i>638</i>
<i>Олександра Жоріна, Наталія Гринчишин, МІНЕРАЛЬНІ ТА ОРГАНІЧНІ ВІДХОДИ ЯК ІНСТРУМЕНТИ ДОСЯГНЕННЯ ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ.....</i>	<i>642</i>
<i>Тетяна Пекарюк, Катерина Король, Василь Попович, ДЕСТРУКТИВНИЙ ВПЛИВ ВІЙНИ НА ЕКОСИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ГЛОБАЛЬНИЙ КЛІМАТ.....</i>	<i>647</i>
<i>Дмитро Горб, Іван Паснак, АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЧИННИКІВ НА ТРИВАЛІСТЬ РУХУ ПОЖЕЖНОГО АВТОМОБІЛЯ ДО МІСЦЯ ВИКЛИКУ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ</i>	<i>651</i>