

3. Показано, що при контроле в діапазоні частот ультразвука 3,2...6 МГц для підвищення чутливості дефектоскопії кількість періодів частоти коливаний в зондируючому імпульсі слідует установлювати більше 6...7.

Список літератури: 1. <http://www.ptsndt.com>

Надійшла до редакції 22.10.2012

УДК 620.179.16

**Повищення чутливості іммерсионного ультразвукового контролю заготовок для залізничних осей / Познякова М.Е., Сучков Г.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків НТУ «ХПІ». – 2012. – № 46(952). – С. 222-227. - Бібліогр.: 1 назв.**

У статті розглянуто процес взаємодії ультразвукового поля з металом залізничної осі, який формує відповідну реакцію, що містить дані про наявність у виробі внутрішніх дефектів та про їх характеристики. Наведено результати дослідження по виявленню моделей дефектів у вигляді плоскодонних відбивачів у заготовці для ж.д. осі.

**Ключові слова:** ультразвуковий контроль, іммерсійний метод, залізнична ось, п'єзоелектричний перетворювач.

This article describes the interaction of the ultrasound field with a metal rail axis, which generates a response that contains data on the presence of internal defects in the product and its characteristics. The results of the study to detect patterns of defects in the form of flat reflectors in the preset for railway axis.

**Keywords:** ultrasonic control, immersion method, the railway axis, the converter piezoelectric.

УДК 539.375:621.983

**Ю. П. ФЕЩУК**, канд. техн. наук, ст. викл., Луцький НТУ, Луцьк

**П. П. САВЧУК**, докт. техн. наук, проф., Луцький НТУ, Луцьк

**Н. П. ЗАЙЧУК**, канд. техн. наук, доц., Луцький НТУ, Луцьк

**Д. А. ГУСАЧУК**, канд. техн. наук, доц., Луцький НТУ, Луцьк

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З НЕНАСКРІЗНИМИ ТРІЩИНАМИ**

У статті наведена математична модель пружно-пластичної оболонки, ослабленої ненаскрізною тріщиною. За допомогою аналога  $\delta_c$ -моделі тривимірну пружно-пластичну задачу про напружений стан оболонки з тріщиною заданих розмірів зведено до двовимірної пружної задачі для такої ж оболонки з тріщиною невідомих розмірів. Досліджено залежність розкриття фронту поверхневої тріщини в трансверсально-ізотропній сферичній оболонці від навантаження, геометричних та механічних параметрів.

**Ключові слова:** ненаскрізні тріщини, оболонкові конструкції, надійність,  $\delta_c$ -модель

**Вступ.** З точки зору практичного застосування дослідження ненаскрізних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій є однією з найбільш важливих задач механіки руйнування. В загальному випадку ця задача зводиться до задачі про трьохвимірну тріщину, що може поширюватись в тілі скінченних розмірів, де на поле напружень, збурених тріщиною, значно впливає границя твердого тіла. Побудова точних розв'язків таких задач є надзвичайно важким завданням. В зв'язку з цим розвиваються числові або наближені методи дослідження тонкостінних елементів конструкцій з ненаскрізними тріщинами.

Реальні конструкції містять різні поверхневі, внутрішні чи наскрізні дефекти (тріщини, пори, включення, непровари, надрізи тощо), які мають різну, як правило, нерегулярну геометрію і зона дефекту, взагалі кажучи, може мати декілька внутрішніх тріщин довільної форми. При розробці розрахункових схем різні дефекти замінюють тріщинами, які є найбільш небезпечним видом дефектів. Як правило, вважають, що ці тріщини мають ідеально правильну форму, еквівалентні розміри і орієнтацію. Розрахункові схеми заміни

© Фещук Ю. П., Савчук П. П., Зайчук Н. П., Гусачук Д. А.

реальних дефектів тріщинами ідеальної форми приведені в методичних рекомендаціях [1], що поширюються на корпуси реакторів і парогенераторів, трубопроводи, ротори турбін та турбогенераторів, інше енергетичне обладнання, яке підлягає розрахунку на тріщиностійкість. Схематизуються геометричні параметри елемента конструкції і дефекту, а також параметри напруженого стану конструкції, тобто розподіл напружень в зоні ідеалізованої тріщини.

Зауважимо, що навіть для ідеалізованої ненаскрізної тріщини в тонкостінних елементах конструкції задача про дослідження розподілу напружень в її околі дуже складна через її трьохвимірність та необхідність врахування пластичних деформацій. Тому пропонується використати наближений метод дослідження таких задач, який ґрунтується на використанні  $\delta_c$ -моделі.

Аналог цієї моделі застосовувався для дослідження напруженого стану й граничної рівноваги циліндричних і ізотропних сферичних оболонок, ослаблених наскрізними тріщинами [2-7]. Значна увага дослідженню граничного стану пологої оболонки з тріщинами приділяється в [8]. В [9] виведено рівняння для поперечно-ізотропної сферичної оболонки з тріщиною.

**Мета роботи.** Розробити спосіб визначення граничної рівноваги оболонкових конструкцій з ненаскрізними тріщинами для підвищення їх експлуатаційної надійності.

**Матеріали досліджень.** Розглянемо оболонку, ослаблену внутрішньою тріщиною довжини  $2l_0$  (рис. 1), яка розміщена в перерізах  $x=0$  або  $y=0$  і обмежена лініями, паралельними координатним. Відстань від границі тріщини до зовнішньої і внутрішньої поверхонь оболонки –  $2d_2$  і  $2d_1$  відповідно. Будемо вважати, що оболонка і береги тріщини завантажені лише симетричними відносно лінії тріщини зусиллями та моментами. В процесі деформації береги тріщини не контактують, а її кінці знаходяться в однакових умовах. Обмежимося розглядом досить глибоких тріщин ( $d_3 = d_1 + d_2 \leq 0,6h$ ). Розміри тріщини, рівень зовнішнього навантаження та властивості матеріалу передбачаються такими, що в околі тріщини по всій глибині оболонки вузькою смугою розвиваються пластичні деформації.

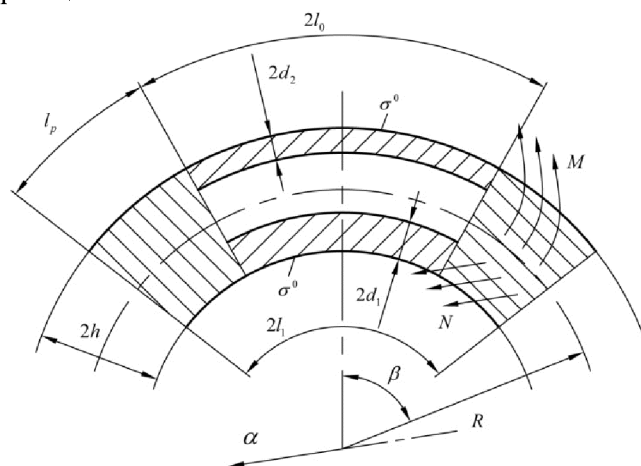


Рис. 1 – Модель внутрішньої тріщини в оболонці

Тепер, відповідно до  $\delta_c$ -моделі, зони пластичних деформацій замінимо поверхнями розриву пружних переміщень і кутів повороту, а реакцію матеріалу пластичної зони на пружну – відповідними зусиллями та моментами. Будемо вважати, що на продовженні тріщини в глибину до зовнішньої і внутрішньої поверхонь оболонки, тобто в області  $x \in ]-x_0; x_0[$ ,  $\gamma \in [-h; -h + 2d_1] \cup [h - 2d_2; h]$  діють постійні напруження

$\sigma^0 = (\sigma_B + \sigma_T)/2$  ( $x$  – координата, вздовж якої розміщена тріщина). В пластичних зонах на продовженні тріщини по довжині діють невідомі нормальне зусилля  $N$  та згинний момент  $M$ , які задовольняють одну з умов пластичності, для ідеально пружно-пластичних матеріалів або для матеріалів із зміцненням.

Таким чином, в рамках прийнятої моделі ненаскрізна тріщина довжиною  $2l_0$  замінюється наскрізною тріщиною невідомої довжини  $2l_1$ , на берегах якої виконуються умови

$$N_s(x) = \begin{cases} N_s^{(1)} + N^l - N_s^0, & |x| < x_0, \\ N - N_s^0, & x_0 \leq |x| \leq x_1, \end{cases}$$

$$M_s(x) = \begin{cases} M_s^{(1)} + M^l - M_s^0, & |x| < x_0, \\ M - M_s^0, & x_0 \leq |x| \leq x_1, \end{cases}$$

$N^l$  та  $M^l$  – нормальне зусилля та згинний момент, які є реакцією матеріалу на розрив внутрішніх зв'язків над і під тріщиною і які згідно з прийнятими припущеннями про напруження в цих зонах визначаються за формулами

$$N^l = 2d_3\sigma^0, \quad M^l = 2\sigma^0(h - d_3)(d_2 - d_1)$$

$N_s^{(1)}, M_s^{(1)}$  – зусилля та момент, прикладені до берегів тріщини;

$N^0, M^0$  – ці ж параметри в суцільній оболонці на лінії тріщини, зумовлені зовнішнім навантаженням.

**Результати досліджень.** Розглянемо пружно-пластичну трансверсально-ізотропну сферичну оболонку, ослаблену поверхневою прямолінійною в плані тріщиною завдовжки  $2l_0$  і завглибшки  $2(h - d)$  ( $2h$  – товщина оболонки) (рис. 2).

Віднесемо серединну поверхню оболонки до декартової системи координат  $XOY$ , початок якої сумістимо з центром тріщини, а вісь  $OX$  – з лінією тріщини. Не обмежуючи загальності задачі, вважатимемо, що оболонка знаходиться під дією зовнішнього навантаження, а до протилежних берегів тріщини прикладені самозрівноважені (рівні за величиною і протилежно направлені) зусилля та моменти. Якщо до берегів тріщини прикладено довільне навантаження, то, як і для плоскої [10] чи просторової [11], задачу можна звести до попередньої і до задачі про дію деякого додаткового навантаження на місці тріщини в суцільній оболонці. Розміри тріщини, навантаження та властивості матеріалу оболонки будемо вважати такими, що пластичні деформації розвиваються вузькою смугою на продовженні тріщини по всій товщині оболонки. Позначимо довжину пластичних зон зліва та справа від тріщини відповідно  $l_2$  та  $l_3$ . У відповідності з прийнятою моделлю замінимо пластичні зони поверхнями розриву пружних переміщень та кутів повороту, а реакцію пластичних зон  $l_2, l_3$  на пружний об'єм – відповідно нормальними  $N^{(i)}$ , перерізуючими  $Q^{(i)}$  та зсувними  $S^{(i)}$  зусиллями, а також згинними  $M^{(i)}$  та крутними  $H^{(i)}$  моментами ( $i = 2, 3$ ), які повинні задовольняти умову пластичності тонких оболонок

$$F^{(i)}(N^{(i)}, S^{(i)}, Q^{(i)}, M^{(i)}, H^{(i)}, \sigma_T, \sigma_B) = 0,$$

де  $\sigma_T$  та  $\sigma_B$  – поріг текучості та границя міцності матеріалу оболонки. В пластичній зоні під тріщиною  $|x| \leq l_0$ ,  $-h \leq \gamma \leq (h-d)$  ( $\gamma$  – нормальна до серединної поверхні координата) діють постійні напруження  $\sigma_0$ .

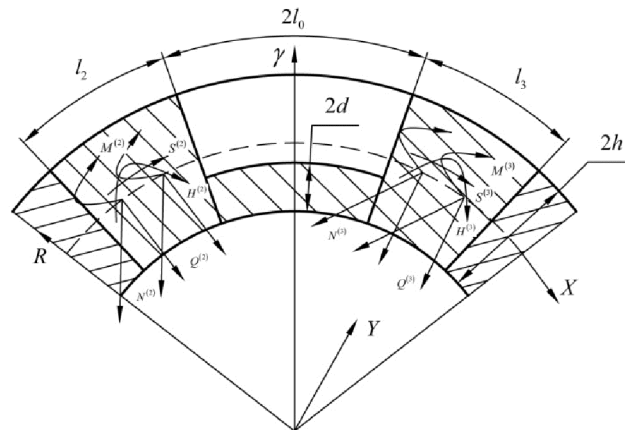


Рис. 2 – Модель поверхневої тріщини в оболонці

Отже, в рамках прийнятої моделі поверхневу тріщину завдовжки  $2l_0$  замінюємо наскрізною невідомої довжини  $2l_1 = 2l_0 + l_2 + l_3$ , на берегах якої виконуються умови

$$T_i^+(X, 0) = T_i^-(X, 0) = f_i(X) \quad (i = \overline{1, 5}). \quad (1)$$

Тут

$$f_i(X) = \begin{cases} T_i^{(1)} + T_i^{(l)} - T_i^{(0)}, & |X| \leq l_0, \\ T_i^{(2)} - T_i^{(0)}, & X \in l_2, \\ T_i^{(3)} - T_i^{(0)}, & X \in l_3. \end{cases}$$

$T_1 = N_2$ ,  $T_2 = M_2$ ,  $T_3 = S$ ,  $T_4 = Q_2$ ,  $T_5 = H$ ;  $T_i^{(l)}$  – зусилля та моменти, які є реакцією матеріалу на розрив внутрішніх зв'язків в пластичній зоні під тріщиною;  $T_i^{(0)}$  – зусилля та моменти основного напруженого стану, зумовленого зовнішнім навантаженням в оболонці без тріщини;  $T_i^{(1)}$  – зусилля та моменти прикладені до берегів реальної тріщини.

Таким чином, пружно-пластична задача зведена до пружної, розв'язок якої будемо на основі методу дисторсій. Система диференціальних рівнянь трансверсально-ізотропної сферичної оболонки, що враховує наявність тріщини, має вигляд

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi - \frac{D_0 l_1^2}{R} \nabla^2 w = -D_0 l_1^2 F_1^0,$$

$$\nabla^2 \nabla^2 w + \frac{1}{DR} (l_1^2 - \varepsilon \nabla^2) \nabla^2 \varphi = l_1^2 F_2^0, \quad (\nabla^2 - l_1^2 \mu^2) \psi = F_3^0,$$

де

$$F_1^0 = (\nabla^2 + \partial_2^2) \varepsilon_{22}^0 - \partial_1 \partial_2 \varepsilon_{12}^0, \quad F_2^0 = \frac{1}{l_1} \nabla^2 (\partial_2 \varepsilon_{23}^0 + \nu \chi_{22}^0) - (1 - \nu) [\nabla^2 \chi_{22}^0 + 2 \partial_1 \partial_2 \chi_{12}^0],$$

$$F_3^0 = -\frac{2}{\mu^2} \left[ 2\partial_1 \partial_2 \chi_{22}^0 - (\partial_2^2 - \partial_1^2) \chi_{12}^0 \right] - l_1 (\partial_2 \varepsilon_{12}^0 - \partial_1 \varepsilon_{23}^0);$$

$$\mu^2 = \frac{2}{\varepsilon(1-\nu)};$$

$$\varepsilon = \frac{h^2}{3k'(1-\nu^2)} \frac{E}{G'};$$

$$D_0 = 2Eh; D = \frac{2Eh^3}{3(1-\nu^2)}; \nabla^2 = \partial_1^2 + \partial_2^2; \partial_1 = \frac{\partial}{\partial x}; \partial_2 = \frac{\partial}{\partial y}; x = \frac{X}{l_1}; y = \frac{Y}{l_1},$$

$E$  та  $\nu$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона в серединній поверхні (поверхня ізотропії),  $G'$  – модуль зсуву в площадках, перпендикулярних до серединної поверхні,  $R$  – її радіус,  $k'$  – введений для перерізуючих зусиль коефіцієнт зсуву,  $\varepsilon_{ij}^0, \chi_{ij}^0$  – (функціонали, що виражаються через стрибки переміщень і кутів повороту).

Враховуючи, що зусилля і моменти зберігають неперервність у довільній точці оболонки, а переміщення  $u, v, w$  та кути повороту  $\gamma_1, \gamma_2$  мають стрибки при переході через лінію тріщини (розриви першого роду) та розглядаючи їх як узагальнені функції [21] виражаємо  $\varepsilon_{ij}^0$  та  $\chi_{ij}^0$  через стрибки переміщень і кутів повороту

$$\varepsilon_{12}^0 = \frac{1}{l_1} [u(x)] \delta(y), \quad \varepsilon_{22}^0 = \frac{1}{l_1} [v(x)] \delta(y), \quad \varepsilon_{23}^0 = \frac{1}{l_1} [w(x)] \delta(y),$$

$$\chi_{12}^0 = \frac{1}{2l_1} [\gamma_1(x)] \delta(y), \quad \chi_{22}^0 = \frac{1}{l_1} [\gamma_2(x)] \delta(y),$$

де  $\delta(y)$  – функція Дірака.

На основі фундаментальних розв'язків системи та операції згортки побудовано інтегральні представлення ключових функцій  $\varphi, w, \psi$ . Підставляючи їх у формули для визначення зусиль та моментів через ключові функції знайдемо їх значення в довільній точці оболонки, зумовлені наявністю тріщини. Задовольняючи тепер умови на берегах тріщини (1) для знаходження невідомих стрибків узагальнених переміщень  $[u], [v], [w], [\gamma_1], [\gamma_2]$  отримуємо систему п'яти сингулярних інтегральних рівнянь

$$\sum_{k=1}^5 \int_{-1}^1 \Omega_k(\xi) K_{ik}(x-\xi) d\xi = f_i^*(x), \quad |x| < 1, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (2)$$

яка розпадається на дві: систему двох та трьох рівнянь, що відповідають симетричному та антисиметричному відносно лінії тріщини розподілу напружень. В системі (2) позначено

$$\Omega_1(\xi) = \frac{1}{l_1} \frac{d}{d\xi} [v(\xi)], \quad \Omega_2(\xi) = \frac{Rc}{l_1} \frac{d}{d\xi} [\gamma_2(\xi)],$$

$$\Omega_3(\xi) = \frac{1}{l_1} \frac{d}{d\xi} [u(\xi)], \quad \Omega_4(\xi) = \frac{Rc}{l_1} \frac{d}{d\xi} [\gamma_1(\xi)], \quad \Omega_5(\xi) = \frac{1}{l_1} \frac{d}{d\xi} [w(\xi)],$$

$$f_i^*(x) = b_i f_i(X/l_1), \quad b_1 = b_3 = b_5 = \frac{1}{Eh}, \quad b_2 = b_4 = \frac{1}{RcEh}, \quad c = \frac{h}{\sqrt{3(1-\nu^2)}R}.$$

Ядра системи інтегральних рівнянь (2) мають вигляд

$$K_{ij}(z) = \frac{a_{ij}}{z} + K_{ij}^0(z), \quad (i \neq j = 1, 2, 3, 4, 5),$$

$$a_{11} = a_{33} = 1; \quad a_{22} = a_{44} = 1 - \nu^2; \quad a_{55} = 2R^2 c / \varepsilon,$$

$K_{ij}^0(z)$  – неперервні функції.

Відзначимо, що в системах інтегральних рівнянь (5.2.6) невідомі не тільки стрибки узагальнених переміщень, а й довжини пластичних зон  $l_2$  та  $l_3$ . Крім цього в праві частини рівнянь входять десять невідомих зусиль та моментів  $P_i^{(2)}, P_i^{(3)}, (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  – реакції пластичних зон на пружний об'єм. Тому систему (2) розв'язують сумісно з умовами обмеженості зусиль і моментів біля тріщини (достатньо, щоб коефіцієнти інтенсивності зусиль і моментів біля вершин фіктивної тріщини були рівні нулю) та умовами пластичності тонких оболонок.

Як приклад розглянемо оболонку, що знаходиться під дією тільки симетричного або антисиметричного відносно тріщини та симетричного відносно перерізу  $x = 0$  навантаження. Тоді  $l_2 = l_3, P_i^{(2)} = P_i^{(3)}, (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ .

Для оболонки, що знаходиться під дією внутрішнього тиску (симетричне навантаження,  $N_2^0 = const, M_2^0 = 0$ ) інтенсивності  $p$  проведено числовий аналіз. Брали умову пластичності Треска у вигляді пластичного шарніру. В цьому випадку  $N^I = 2d\sigma_0, M^I = 2d(h-d)\sigma_0, \sigma_0 = (\sigma_T + \sigma_B)/2$ . Розкриття тріщини визначаємо за формулою

$$\delta(x, y) = [v(x)] + \gamma[\gamma_2(x)].$$

На рис. 3 показано залежність відносного розкриття наскрізної ( $d = 0$ ) тріщини  $\delta^* = \delta(l_0/l)E/(l_0\sigma_T)$  від її відносної довжини  $l_0/h$ . Обчислення проводились для таких значень параметрів:  $p = 0,7h\sigma_T/R; E/G' = 2,6; 20; R/h = 100; k' = 5/6; \nu = 0,3$ . Як бачимо зі збільшенням довжини тріщини вплив параметра  $E/G'$  на розкриття тріщини зменшується.

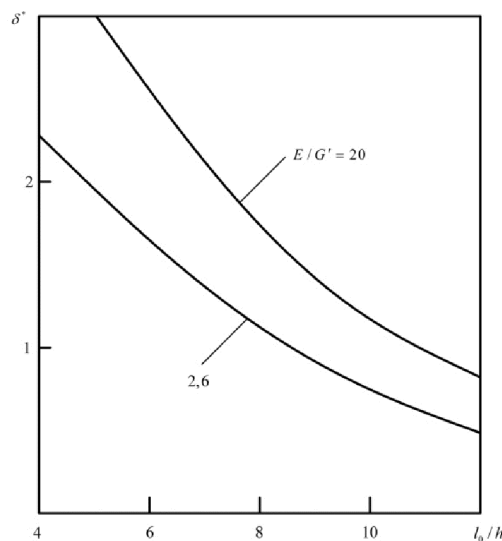


Рис. 3 – Залежність розкриття тріщини від її довжини та параметра зсувної податливості при симетричному навантаженні

У випадку, коли зовнішнє навантаження викликає в оболонці без тріщини на лінії, що відповідає тріщині, лише перерізує зусилля  $Q_2^0 = const$  (антисиметричне навантаження) умову пластичності брали в такому вигляді

$$\left[ \frac{1}{2h} \left( S + \frac{3\gamma}{h^2} H \right) \right]^2 + \left( \frac{1}{2hk'} Q \right)^2 = 2\sigma_{T3}^2,$$

де  $\sigma_{T3}$  – поріг текучості матеріалу оболонки на зсув. В цьому випадку  $S^l = Q^l = 2d\sigma_{T3}$ ,  $H^l = 2d(h-d)\sigma_{T3}$  і розкриття тріщини визначаємо за формулою

$$\delta(x, y) = \sqrt{[u(x)]^2 + [w(x)]^2} + \gamma[\gamma_1(x)].$$

На рис. 4 показано залежність відносного розкриття вершини тріщини від відносного навантаження  $n^0 = Q_2^0 / (2h\sigma_T)$  для різних глибин поверхневої тріщини, довжина якої  $l_0 = 6h$ . Інші параметри такі ж як і в симетричному випадку.

Зауважимо, що у випадку довільного навантаження система інтегральних рівнянь (2) зав'язана через довжини пластичних зон.

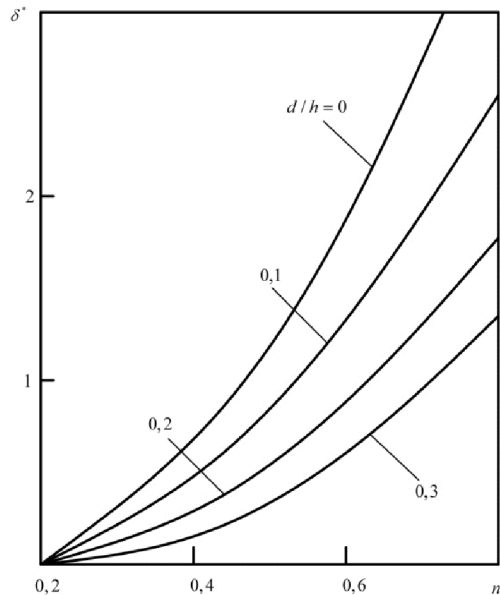


Рис. 4 – Залежність розкриття поверхневої тріщини від її глибини та величини перерізуєчої сили

**Висновки.** В статті приведено математичну модель пружно-пластичної оболонки, ослабленої ненаскрізною (поверхневою) тріщиною. За вихідні взято ключові рівняння уточненої теорії оболонок типу Тимошенка. За допомогою аналога  $\delta_c$ -моделі трьохмірну пружно-пластичну задачу про напружений стан оболонки з тріщинами заданих розмірів зведено до двомірної пружної задачі для такої ж оболонки з наскрізною тріщиною невідомих розмірів. Пружну задачу зведено до системи сингулярних інтегральних рівнянь з невідомими границями інтегрування. Як приклад, досліджено залежність розкриття фронту поверхневої тріщини в трансверсально-ізотропній сферичній оболонці від навантаження, геометричних та механічних параметрів.

**Список літератури:** 1. Методические рекомендации. МР 108.7–86. Оборудование энергетическое. Расчеты и испытания на прочность. – М.: НПО ЦНИТМАШ, 1986. – 29 с. 2. Николишин М.М. Напряженное состояние упругопластических оболочек с несквозными трещинами / М.М. Николишин // Мат. методы и физ.-мех. поля, 1992.- Вып. 35.- С.147-151. 3. Николишин М.М. Предельное равнове-

сие сферической упругопластической оболочки с двумя коллинеарными трещинами / М.М. Николишин, Т.Е. Маселко // Пробл. прочности, 1994.- №8.- С.24-28. 4. Осадчук В.А. Напряженно деформированное состояние и предельное равновесие оболочек с разрезами / В.А. Осадчук // К.: Наук. думка, 1985.- 224с. 5. Фещук Ю.П. Замкнута трансверсально-ізотропна циліндрична оболочка з поздовжньою тріщиною / Ю.П. Фещук // Наукові нотатки Луцького національного технічного університету: Міжвузівський збірник. Випуск 25. – Луцьк: ЛНТУ. – 2009.- С.395-401. 6. Erdogan F. Ductile fracture of pipes and cylindrical containers with circumferential flaw / F. Erdogan, F. Delale // Trans. ASME. Ser. J, J. Pressure Vessel Technol, 1981.- 103.- P.160-168. 7. Erdogan F. Plastic strip model for thin shells // Prospects Fract. Mech.- Leyden, 1974.- P.609-617. 8. Kushnir R.M. Limit analysis of a shallow shell with a system of arbitrarily located cracks / R.M.Kushnir, M.M. Nykolyshyn, M.Yo. Rostun, Yu.P.Feshchuk // Shell Structures: Theory and Applications. Proceedings of the 8TH SSTA conference, Jurata, Poland, 12-14 October 2005. P.139 – 142. 9. Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing slits / D.S. Dugdale // J. Mech. and Phys. Solids, 1960.-8, №2.-P.100-104. 10. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами / М.П. Саврук // Киев: Наук. думка, 1981. – 324 с.

*Надішла до редколегії 21.10.2012*

УДК 539.375:621.983

**Підвищення експлуатаційної надійності оболонкових елементів конструкцій з ненаскрізними тріщинами / Фещук Ю.П., Савчук П.П., Зайчук Н.П., Гусачук Д.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Проблемы качества продукции в машиностроении и металлургии – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. - № 46(952). – С 227-234. – Бібліогр.: 10 назв.**

В статье приведена математическая модель упруго-пластической оболочки, ослабленной несквозной трещиной. С помощью аналога  $\delta_c$ -модели трехмерную упруго-пластическую задачу о напряженном состоянии оболочки с трещинами заданных размеров сведено к двумерной упругой задаче для такой же оболочки с трещиной неизвестных размеров. Исследована зависимость раскрытия фронта поверхностной трещины в трансверсально-изотропные сферической оболочке от нагрузки, геометрических и механических параметров.

**Ключевые слова:** несквозные трещины, оболочечные конструкции, надежность,  $\delta_c$ -модель.

The aim is to develop a method of determining the limit equilibrium shell structures with non-through cracks to improve their operational reliability. In the article the mathematical model of elastic-plastic shell weakened n non-through (surface) crack. Over the weekend taken the key equation of the specified type shell theory of Timoshenko. With analogue  $\delta_c$ -model three-dimensional elastic-plastic problem of stress cracks the shell of a given size is reduced to two-dimensional elastic problem for the same membrane with continuous crack of unknown size. Elastic problem is reduced to a system of singular integral equations with unknown boundaries of integration. As an example, the dependence of the front surface opening cracks in transversely isotropic spherical shell, the load, geometrical and mechanical parameters. First received the system of boundary integral equations for the transversal-isotropic spherical shell weakened nenaskriznymy or surface cracks.

**Keywords:** non-through crack, shells constructions, reliability,  $\delta_c$ -model.