

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ ІНДИКАТОРІВ ВТОМИ

М. В. Лисканич, А. П. Джус

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42331  
e-mail: public@ifdtung.if.ua

*Представлена методика определения геометрических параметров концентратора напряжений индикаторов усталости, исходя из теории хрупкого разрушения твердого тела. Произведен расчет коэффициента интенсивности напряжений для полых цилиндрических индикаторов.*

Однією з умов використання індикатора як локальної моделі конструкції різьби відносно її характеристик міцності від утомленості є досягнення однакового рівня напруження в небезпечних перерізах різьби і індикатора.

Рівень максимальних напружень в зоні руйнування від утомленості індикатора залежить від параметрів концентратора напружень. Тому вибір необхідних характеристик міцності від утомленості індикаторів, виготовлених з того ж матеріалу, що і досліджуваній елемент колони, забезпечується шляхом оптимального проектування концентратора напружень.

В роботі [1] запропоновано вирази, за якими визначають коефіцієнт концентрації напружень для індикаторів втоми різьбових з'єднань, що виконані у вигляді сталеві порожнисті циліндричної втулки з глибокою V-подібною виточкою. Але вони базуються на рівняннях статистичної теорії подібності руйнування від утомленості та розв'язках Г. Нейбера. Ці залежності добре описують вплив конструктивних чинників на характеристики опору втоми індикаторів при радіусах кривизни профілю дна концентратора напружень  $\rho > \rho_{кр}$ , де  $\rho_{кр}$  – граничне значення радіуса кривизни концентратора, що обмежує область застосування теорії подібності. При зменшенні радіуса кривизни ефективний коефіцієнт концентрації збільшується тільки до значення  $\rho > \rho_{кр}$ , після чого залишається постійним.

Але багатьма дослідниками, такими як Феннер, Фрост, П.І.Кудрявцев [2], встановлено, що при  $\rho < \rho_{кр}$  спостерігається інша закономірність порівняно з тою, що викладена в [1]. В критичній області при  $\rho = \rho_{кр} = 0,1 \dots 0,6$  мм [2] з'являються тріщини втоми, що не розвиваються, та існують дві межі витривалості, які визначаються за критеріями появи перших макроскопічних тріщин втоми  $\sigma_{-1 in}$  і кінцевого руйнування  $\sigma_{-1 in.p.}$ . Межі витривалості за критерієм руйнування  $\sigma_{-1 in.p.}$  не залежать від радіуса кривизни  $\rho$  в концентраторі, тобто залишаються постійними із зменшенням  $\rho$  в облас-

*Introduced is the methodicals of the determination of the geometric measurements of the voltage concentrator of rundown indicators comind out from the theory of the brittle destruction of the hard solid.*

*Produced is the calculation of the coefficient of voltage intension for hollors cylindrical indicators.*

ті  $\rho < \rho_{кр}$ , а межа витривалості, що визначається за критерієм появи перших тріщин від утомленості, знижується зі зменшенням  $\rho$ , тобто зі збільшенням  $\alpha_T$  – теоретичного коефіцієнта концентрації напружень.

Ефективний коефіцієнт концентрації напружень в цьому випадку визначатиметься за формулою [3]

$$K\sigma_{in} \geq \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1 in.p.}} \quad (1)$$

Межі витривалості за руйнуванням від утомлення  $\sigma_{-1 in.p.}$  визначаються з відомої умови нерозвитку тріщини лінійної механіки руйнування

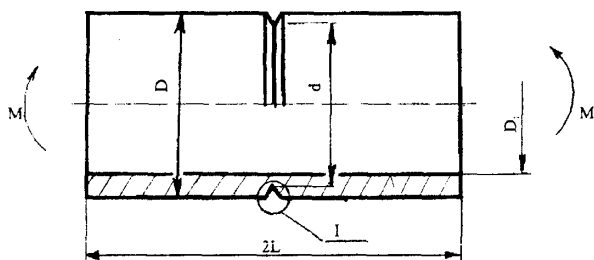
$$\Delta K_{ef} \leq \Delta K_{th}, \quad (2)$$

де:  $\Delta K_{ef}$  – ефективна величина коефіцієнта інтенсивності напружень;

$\Delta K_{th}$  – поріг розвитку тріщини від утомленості.

Визначимо приблизне значення коефіцієнта інтенсивності напружень індикатора, застосовуючи відомий інтерполяційний метод [4] для випадку згину порожнистого циліндра із зовнішнім концентратором напружень. Причому радіус кривизни концентратора приймаємо настільки малим, що  $\rho = \rho_{тр}$ , де  $\rho_{тр}$  – радіус кривизни зовнішньої кільцевої тріщини від утомленості. Отже, прийmemo індикатор за довгий пружний порожнистий циліндр зовнішнім діаметром  $D$  і внутрішнім  $D_1$ , що ослаблений концентратором напружень з контурним діаметром  $d$  і навантажений згинальним моментом  $M$  (рис. 1).

Залежно від внутрішнього діаметра порожнистого циліндра розглянемо два граничні випадки: товстостінний циліндр  $D_1 / D = \varepsilon_1 \rightarrow 0$  і тонкостінний циліндр,  $\varepsilon_1 \rightarrow 1$ . На основі міркувань, викладених в роботі [4], визначимо коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$ , виходячи з таких інтерполяційних співвідношень:



$$\frac{d}{D} = \varepsilon; \quad \frac{D_1}{D} = \varepsilon_1$$

Рисунок 1 – Розрахункова схема індикатора з гострим концентратором напружень ( $\rho \ll \rho_{кр}$ )

$$K_I = \sigma_{ном} \cdot \alpha;$$

$$\sigma_{ном} = \left( \sqrt{\sigma_{ном}^{(1)}} - \sqrt{\sigma_{ном}^{(1)}} \Big|_{\varepsilon_1=0} + \sqrt{\sigma_{ном}^{(0)}} \right)^2; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0 \alpha_1}{\sqrt{\alpha_0^2 + \alpha_1^2}},$$

де:  $\sigma_{ном}^{(0)}$ ,  $\sigma_{ном}^{(1)}$  – узагальнені номінальні напруження, обчислені для кожного граничного випадку;

$\alpha_0, \alpha_1$  – геометричні частини коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_I^{(0)}$  і  $K_I^{(1)}$  відповідно для товстого ( $\varepsilon_1 \rightarrow 0$ ) і тонкого ( $\varepsilon_1 \rightarrow 1$ ) циліндрів.

Згин товстостінного циліндра ( $\varepsilon_1 \rightarrow 0$ ) ідентичний згину суцільного циліндра з зовнішньою кільцевою тріщиною [4], тоді для визначення коефіцієнта інтенсивності напруження  $K_I^{(0)}$  застосуємо формулу [4]

$$K_I^{(0)} = \frac{0,399M \cdot \sqrt{1-\varepsilon} \cdot (1-\varepsilon^{-1})^2}{D \cdot 2\sqrt{D} \cdot \sqrt{\varepsilon^{-1} - 0,8012}}. \quad (4)$$

При цьому силова  $\sigma_{ном}^{(0)}$  і геометрична частина коефіцієнта  $\alpha$  становлять

$$\sigma_{ном}^{(0)} = \frac{8M}{\pi D^3} \left( \frac{1}{\varepsilon} + 1 \right)^2;$$

$$\alpha_0 = \frac{0,627\sqrt{D} \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{1-\varepsilon}}{\sqrt{1-0,8012\varepsilon}}. \quad (5)$$

В другому граничному випадку, при  $\varepsilon_1 \rightarrow 1$ , отримаємо тонкостінний циліндр, що згинається моментом  $M$ . Тоді довкола точки, в якій досягаються максимальні напруження, приблизно буде такий самий напружений стан, як і при розтягуванні смуги шириною  $0,5(D - D_1)$  з боковою тріщиною довжиною  $0,5(D - d)$  зусиллям

$$N = \frac{16M}{\pi D^2 \cdot (1 + \varepsilon_1^2) \cdot (1 + \varepsilon_1)}, \quad \varepsilon_1 < 1. \quad (6)$$

Визначимо коефіцієнт інтенсивності напруження смуги з боковою тріщиною, що розтягується з зусиллям  $N$ . Цю допоміжну задачу розв'язуємо відомим методом [4], досліджуючи при цьому два граничні випадки: мілка тріщина, тобто  $0,5(D - d) \rightarrow 0$  ( $\varepsilon \rightarrow 1$ ); глибока тріщина  $0,5(D - d) \rightarrow 0,5(D - D_1)$  ( $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_1$ ).

У випадку мілкої тріщини ( $\varepsilon \rightarrow 1$ ) коефіцієнт інтенсивності напружень визначається за формулою [5]

$$K_I^{(1c)} = 2,81 \frac{N\sqrt{1-\varepsilon}}{\sqrt{D} \cdot (1-\varepsilon_1)}. \quad (7)$$

З співвідношення (7) випливає, що

$$\sigma_{ном}^{(1c)} = \frac{2N}{D(1-\varepsilon_1)}; \quad (8)$$

$$\alpha_{1c} = 1,41\sqrt{D} \cdot \sqrt{1-\varepsilon}.$$

Використовуючи результати роботи [5], коефіцієнт інтенсивності напруження при розтягуванні смуги з глибокою тріщиною ( $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_1$ ) визначається за такою формулою:

$$K_I^{(0c)} = 2,81 \frac{N(1-\varepsilon_1)}{(\varepsilon - \varepsilon_1) \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_1}} \times$$

$$\times \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right), \quad (9)$$

де силова і геометрична частини дорівнюють

$$\sigma_{ном}^{(0c)} = \frac{2N}{D(\varepsilon - \varepsilon_1)};$$

$$1,41 \cdot \sqrt{D} \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_{0c} = \frac{1,41 \cdot \sqrt{D} \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right)}{\sqrt{\varepsilon - \varepsilon_1}}.$$

Підставляючи  $\sigma_{ном}^{(0c)}$ ,  $\sigma_{ном}^{(1c)}$ ,  $\alpha_{0c}$ ,  $\alpha_{1c}$  в інтерполяційні співвідношення (3), отримаємо коефіцієнт інтенсивності напруження  $K_I^c$  для смуги з боковою тріщиною довільної глибини, що розтягується з зусиллям  $N$

$$K_I^c = \left[ 14,36M \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right) \times \right.$$

$$\times \left. \frac{\sqrt{1-\varepsilon}}{\varepsilon - \varepsilon_1} \right] \times \left\{ D^2 \cdot \sqrt{D} \cdot (1 + \varepsilon_1^2) \cdot (1 + \varepsilon_1) \times \right.$$

$$\times \left[ (1 - \varepsilon_1)^2 \cdot \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right)^2 + \right.$$

$$\left. \left. + (\varepsilon - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon) \right]^{1/2} \right\}^{-1}. \quad (11)$$

Згідно з результатами роботи [4] і співвідношенням (11) отримуємо

$$\sigma_{ном}^{(1)} = \frac{32 \cdot M \cdot \varepsilon}{\pi D^3 (\varepsilon^4 - \varepsilon_1^4)};$$

$$\alpha_1 = \left[ 1,41\sqrt{D} \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right) \times \right. \\ \times \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot (\varepsilon + \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon^2 + \varepsilon_1^2) \left. \right] \times \\ \times \left\{ (1 + \varepsilon_1) \cdot (1 + \varepsilon_1^2) \cdot \varepsilon \cdot \left[ (1 - \varepsilon_1)^2 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right)^2 + (\varepsilon - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon) \right]^{1/2} \right\}^{-1} \quad (12)$$

Маючи граничні значення  $\sigma_{ном}^{(0)}$ ,  $\sigma_{ном}^{(1)}$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ , за формулами (3) визначимо приблизне значення коефіцієнта інтенсивності напруження  $K_I$  при згині індикатора із зовнішнім гострим концентратором при  $\rho < \rho_{кр}$

$$K_I = \frac{M}{D^2 \sqrt{D}} F(\varepsilon, \varepsilon_1), \quad (13)$$

де

$$F(\varepsilon, \varepsilon_1) = 1,59 \left( \frac{1}{\varepsilon} + 1 + 2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon^4 - \varepsilon_1^4} - \frac{2}{\varepsilon \sqrt{\varepsilon}}} \right) \times \\ \times \frac{\sqrt{\varepsilon} \sqrt{1 - \varepsilon}}{\sqrt{1 - 0,8012\varepsilon}} \cdot \left\{ 0,199\varepsilon^3 (1 + \varepsilon_1)^2 (1 + \varepsilon_1^2)^2 \times \right. \\ \times \left[ (1 - \varepsilon_1)^2 \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right)^2 + (\varepsilon - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon) \right] \times \\ \times \left[ (1 - 0,8012\varepsilon)(1 - \varepsilon_1)^2 \left( 1 - 0,736 \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} \right)^2 \times \right. \\ \left. \left. \times (\varepsilon + \varepsilon_1)^2 (\varepsilon^2 + \varepsilon_1^2)^2 \right]^{-1} + 1 \right\}^{-1/2}.$$

На рис. 2 графічно показана залежність безрозмірної функції  $F(\varepsilon, \varepsilon_1)$  від  $\varepsilon$  при  $\varepsilon_1 = 0,80$  ( $D = 100$  мм;  $D_1 = 80$  мм). На цьому ж графіку пунктирною лінією показано значення функції  $F(\varepsilon, \varepsilon_1)$ , розрахованої за результатами роботи [6] із застосуванням інтерполяційної формули для номінальних напружень приведеної в [7].

Визначивши  $K_I$  як функцію від геометричних розмірів індикатора та параметрів його концентратора напруження, припустимо, що  $K_I = \Delta K_{эф} = \Delta K_{th}$  і прийmemo, що  $M = M_{-1 in.p.}$  – межа згинального навантаження, при якому відбувається втомне руйнування індикаторів. Тоді, враховуючи вираз (13), отримаємо формулу, за якою визначається необхідний згинальний момент межі витривалості  $M_{-1 in.p.}$  інди-

каторів накопичення втомних пошкоджень при радіусах дна концентратора напружень, менших від критичного значення, тобто при  $\rho < \rho_{кр}$

$$M_{-1 in.p.} \leq \frac{\Delta K_{th} \cdot D^2 \sqrt{D}}{F(\varepsilon, \varepsilon_1)}. \quad (14)$$

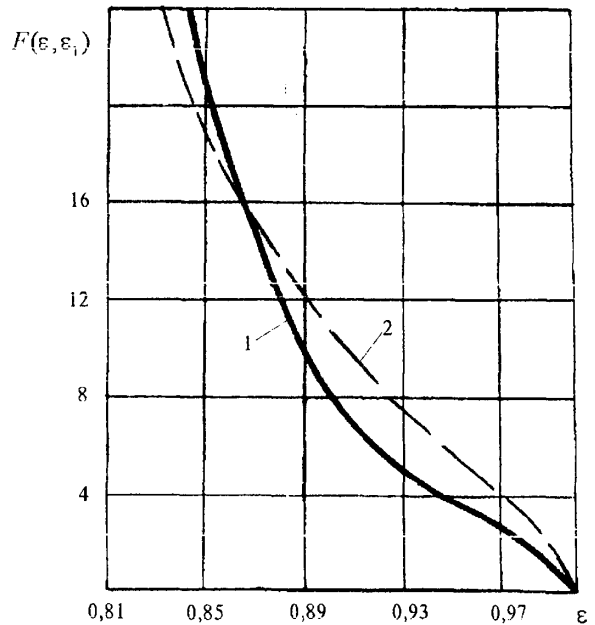


Рисунок 2 – Графічна залежність безрозмірної функції  $F(\varepsilon, \varepsilon_1)$  від  $\varepsilon$  при  $\varepsilon_1 = 0,80$  (1); значення функції  $F(\varepsilon, \varepsilon_1)$ , розрахованої за результатами роботи [6] із застосуванням інтерполяційної формули

Таким чином, за відомим значенням  $\Delta K_{th}$  – порогу розвитку тріщини від утомленості матеріалу, з якого виготовлений індикатор, та задавшись значенням  $M_{-1 in.p.}$  і зовнішнім діаметром індикатора  $D$ , значення якого залежить від типорозміру різьбового з'єднання труб нафтового сортаменту, за формулами (13), (14) можна визначити необхідну глибину концентратора напружень індикатора за умови, що радіус кривизни V-подібної виточки менший критичного значення, тобто при  $\rho < \rho_{кр}$ .

Дана методика пройшла широку апробацію під час стендових досліджень характеристик міцності від утомленості індикаторів накопичення втомних пошкоджень.

### Література

1. Щербюк Н.Д., Дубленич Ю.В., Лисканич М.В. Методика підбору індикаторів усталості різьбових з'єднань / Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т бурової техніки. – М., 1985. – Вып. 60. Исследование, совершенствование и использование новой буровой техники. – С. 126-133.
2. Кудрявцев П.И. Нераспространение усталостной трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Определение характеристики  $K_{IC}$  путем изгиба цилиндрического образца с кольцевой трещиной / Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е., Панько И.Н., Зазуляк В.А. – ФХММ. – 1976. – №2. – С.3-9.
5. Benthem J.P., Koiter W.T. Asymptotic approximations to crack problems. Mechanics Fracture, Vol.1, Leyden, 1973, pp. 131-178.
6. Harris D.O. Stress intensity factors for hollow circumferentially notched round bars. Trans. ASME, s.D89, 1967, №1, pp. 49-54.
7. Нейбер Г. Концентрация напряжения. – М.–Л.: Гостехиздат, 1947. – 204 с.

УДК 552.578.33/7 : 553.98 (477)

## ФІЛЬТРАЦІЙНІ ЕФЕКТИ У НИЗЬКОПОРИСТИХ КОЛЕКТОРАХ

<sup>1</sup>В. О. Федюшин, <sup>1</sup>М. М. Баснюк, <sup>2</sup>Д. Д. Федоришин

<sup>1</sup>ЛВ УкрДГРІ, 79001, м. Львів, пл. Міцкевича, 8, тел. (03422) 722090

e-mail: public@ifdtung.if.ua

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42056

e-mail: public@ifdtung.if.ua

Исследованиями фильтрации газа через низкопористые водонасыщенные породы-коллектора установлено наличие давления прорыва во время вытеснения полярных флюидов. В зависимости от проницаемости породы градиент этого параметра изменяется от 1 до 12 МПа/м. По результатам выполненных экспериментальных работ сделан вывод об отсутствии физической границы между крышкой и коллектором, а кондиционность последнего должна определяться рентабельностью добычи углеводородов.

At the gas filtration examination through the low-porosity water-saturated reservoirs the presence of inrush pressure during displacement of polar fluids is established. Depending from rock permeability the gradient of this parameter changes from 1 to 12 MPa/m. After the results of accomplished experimental works the conclusion was made about the absence of physical boundary between the cap rock and reservoir and quality requirements of the latter must be determined by the profitability of hydrocarbons production.

Низькопористі колектори порівняно з їх високопористими різновидами складені переважно мінеральними зернами псаміто-алевритової структури і містять, як правило, більше глинистого чи карбонатного цементу. В них домінують порові канали діаметром менше  $1 \cdot 10^{-6}$  м, що зумовлює зростання питомої поверхні пор і підсилює її активність під час взаємодії з технологічними рідинами на різних етапах будівництва свердловин.

Поровий простір низькопористих порід істотно (понад 30%) заповнений міцно зв'язаною залишковою водою, а в газонасиченій частині після розкриття пластів можуть проявлятися специфічні ефекти, спричинені дією капілярних сил. Зростання капілярних сил та поверхневої активності породи негативно відбивається на її здатності фільтрувати флюїди. У процесі витіснення полярних флюїдів фільтрація настає лише після створення певного перепаду тиску, достатнього для подолання опору цих сил.

Уперше такі висновки зроблені М. Маскетом у роботі [1], в якій наголошується, що у цементованих породах низьких пористості і проникності капілярні сили повинні відігравати вагомий роль. У подальшому цю тезу постулювало багато авторів [2-5], однак переважно априорно, без належного експериментального обґрунтування. Зацікавленість у вивченні фільтраційних ефектів у низькопроникних породах

зростає з освоєнням покладів нафти та газу на великих глибинах, де збільшується частка саме таких порід. Дослідження цього питання має важливе значення як для теорії, так і для практики газовидобування.

Систематичні експериментальні роботи з визначення перепаду тиску прориву газу  $\Delta p_{пр}$  через водонасичені породи почали виконуватися з 60-х років минулого століття багатьма науковими колективами в основному для вивчення екрануючих властивостей порід-покришок [6-9]. Щодо порід-колекторів цієї проблеми переважно не торкалися.

У високопористих і відповідно високопроникних породах значення  $\Delta p_{пр}$  дуже малі. Прорив газу в досліджуваних зразках настає за умови перепаду тиску менше ніж 0,01 МПа, і насичення породи водою не є перешкодою для відновлення фільтрації газу. Тому в зразках з абсолютною газопроникністю (понад  $10 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>) тиск прориву газу через водонасичені породи практично не спостерігається. У менш проникних породах він може бути істотнішим, що слід перевірити експериментально.

Дослідники флюїдоупорів відносять породи з відкритою пористістю менше 6-8% і проникністю від  $10 \cdot 10^{-15}$  до  $0,01 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup> до напівпокришок, що не викликають зацікавлення як екрани для покладів нафти та газу. За класифікацією А.А.Ханіна [6], вони відповідають гру-