

# МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 539.4

## ВИЗНАЧЕННЯ ТРІЩИНОТРИВКОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ТА ЇХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НА ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКАХ

© Петрина Д.Ю., 2004

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Встановлені геометричні параметри малогабаритних циліндричних зразків з наведеною тріщиною втомлювання для визначення в'язкості руйнування трубних сталей, які забезпечують коректну оцінку значень критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень**

З 70-х років минулого століття однією з найважливіших характеристик, що визначає роботоздатність конструкційних матеріалів, прийнято вважати їх опір поширенню тріщини (в'язкість руйнування) [1,2]. Для її оцінки звичайно використовують зразки з попередньо утвореними тріщинами утоми, які одержують циклічним тренуванням зразка з концентратором напружень типу гострої конструктивної виточки. Зміною тривалості та інтенсивності циклічного навантаження забезпечується нанесення тріщини регламентованої довжини. Подальшим випробуванням такого зразка на розтяг (чи згин) одержують критичні коефіцієнти інтенсивності напружень  $K_{IC}$  або  $K_C$ . Ця методика отримала застосування для високоміцних малопластичних матеріалів.

Відносно матеріалів середньої та низької міцності з підвищеною пластичністю (квазікрихких), то правомірна оцінка їх тріщиностійкості за показниками критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень пов'язана із значними труднощами, оскільки для них, зазвичай, не виконуються обмеження, що накладаються лінійною механікою руйнування на величину пластичної деформації у вершині тріщини з врахуванням довжини останньої та розмірів досліджуваних зразків. Тому довідникова інформація про параметри в'язкості руйнування для трубних сталей, які за своїми показниками міцності та пластичності відносяться до квазікрихких, досить обмежена.

Сучасні методи механічних випробувань в механіці руйнування з їх значним набором математичних рішень виникаючих при цьому крайових задач для зразків з тріщинами, достатнім арсеналом засобів реєстрації місцевих пружно-пластичних деформацій і розвитку тріщин зробили можливим достовірний кількісний аналіз процесів руйнування, тобто

визначення тріщиноотривкості матеріалів, в тому числі і квазікрихких [3,4,5].

Для коректного визначення характеристик тріщиноотривкості квазікрихких матеріалів  $K_{IC}$  або  $K_C$  застосовують поправки на довжину тріщини з врахуванням розміру пластичної зони в її вершині [2,3,4]:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_C}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \quad \text{або} \quad r_y = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2. \quad (1)$$

Згідно з цими поправками товщина  $B$  для плоского зразка з боковою тріщиною у випадку позакентрового розтягу повинна задовольняти такі умови:

$$B \geq 2,5 \left( \frac{K_C}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \quad \text{або} \quad B \geq 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \quad (2)$$

відповідно для плоско-напруженого та плоско-деформованого станів.

З умови автономності зони передруйнування [3,5] розміри для циліндричного зразка з кільцевою тріщиною мають дещо менші обмеження, а саме:

$$D \geq 2,3 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \quad \text{або} \quad D \geq 1,6 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2, \quad (3)$$

де  $D, d$  - зовнішній діаметр і діаметр зразка з кільцевою тріщиною відповідно.

Для отримання достовірних значень  $K_{IC}$  при дослідженні квазікрихких матеріалів (особливо низької міцності) потрібні великогабаритні зразки, що унеможливило проведення таких випробувань через відсутність у заводських лабораторіях потужних випробувальних машин і необхідної контрольно-вимірювальної апаратури. З іншого боку, використання великогабаритних зразків збільшує витрати на їх виготовлення, а також ускладнює реалізацію опе-

рації ініціювання вихідної тріщини в тілі великогабаритного зразка.

Враховуючи те, що у 2000 р. в Україні введені будівельні норми [6], де оцінка залишкової міцності магістральних трубопроводів здійснюється через критичні коефіцієнти інтенсивності напружень зразків, вирізаних з трубопроводів, вказані вище зауваження відносяться в першу чергу до них. Адже такі зразки обмежені в своїх розмірах товщиною стінки труби.

Метою даної роботи є розробка таких конструкцій дослідних зразків, які б дозволили досліджувати трубопровідні сталі за параметром  $K_{IC}$  без значних матеріальних затрат і простими методами випробувань з використанням доступного технологічного оснащення і контрольно-вимірювальної техніки.

Для визначення  $K_{IC}$  найбільш придатним є циліндричний зразок з зовнішньою кільцевою тріщиною. Геометрія такого зразка забезпечує більш стиснені умови навантаження, при яких найбільш повно реалізується плоска деформація. Аналіз численних результатів випробувань циліндричних зразків змінних діаметрів із зовнішньою кільцевою тріщиною (рис.1) свідчить про те, що збільшення діаметра  $D$  призводить до росту параметра  $K_C$  і спаду критичних номінальних напружень  $\sigma_n^*$  в нетто-перерізі таким чином:

$$y_H^* = \frac{4F^*}{pd^2}, \quad (4)$$

де  $F^*$  - руйнівна сила циліндричного зразка, підрахована для нетто-перерізу діаметром  $d$  з кільцевою тріщиною.

Залежності  $K_C = f(D)$  і  $y^* = f(D)$  представлені схематично на рис. 2 кривими 1 і 3 відповідно. Крива 2 представляє залежність  $K_C = f(B)$  і має більш складний характер: спочатку вона зростає, а потім спадає, наближаючись асимптотично до рівня  $K_{IC}$ .

Якщо крива  $K_C = f(D)$  виходить на горизонтальну асимптоту, де досягаються значення  $K_{IC}$  (як вірогідної характеристики матеріалу) і при цьому  $\sigma^* \leq \sigma_{0,2}$ , де  $\sigma_{0,2}$  - межа текучості матеріалу, то  $K_{IC}$  циліндричного зразка певного діаметра буде шуканою інваріантною характеристикою матеріалу. Величину  $K_{IC}$  можна встановити на підставі критичних номінальних напружень  $\sigma^*$  і геометричних розмірів циліндричного зразка  $D$  та кільцевої тріщини  $d$  за такою формулою [4]:

$$K_{IC} = \sigma^* \sqrt{D} f(\varepsilon), \quad (5)$$

де  $\varepsilon = d/D$ , а функція

$$f(\varepsilon) = \frac{0.470\sqrt{1-\varepsilon}}{\varepsilon\sqrt{1-0.8012\varepsilon}}; \quad (6)$$

$$0,4 < \varepsilon = d/D < 0,6.$$

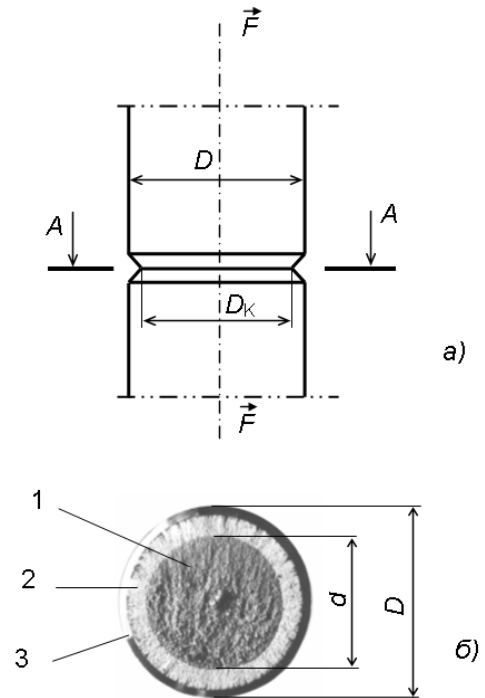


Рис.1. Схема осевого навантаження (а) та злам циліндричного зразка (б), отриманий при розтягу з кільцевою осесиметричною тріщиною (1 – зона конструктивного концентратора; 2 – кільцева втомна тріщина; 3 – зона доламу)

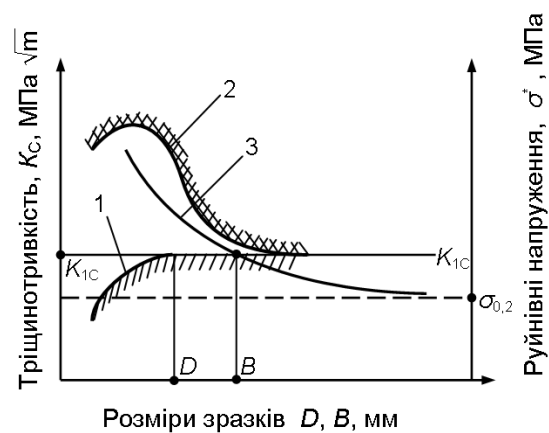


Рис.2. Залежність зміни  $K_C$  від діаметра циліндричного зразка  $D$  (крива 1) і товщини призматич-

ного зразка В (крива 2) та руйнівних напружень  $\sigma^*$  від цих розмірів (крива 3)

За даними [7] відносний розмір тріщини для співвідношень  $\varepsilon = d/D$  в межах  $0,4 < \varepsilon < 0,6$  характеризує стабільність значень  $K_{IC}$ .

Таким чином, якщо після осьового розтягу циліндричного зразка з зовнішнім діаметром  $D$  і кільцевою тріщиною  $d$  буде встановлено, що руйнівні напруження  $\sigma^*$  менші або рівні межі текучості матеріалу  $\sigma_{0,2}$ , з якого виготовлений цей зразок, то підраховане за формулами (5) і (6) значення  $K_{IC}$  вважатиметься дійсною характеристикою тріщиноотривкості для заданого матеріалу. Якщо нерівність  $\sigma^* \leq \sigma_{0,2}$  не забезпечується, то для отримання коректного  $K_{IC}$  матеріалу потрібно збільшити діаметри  $D$  і  $d$  циліндричного зразка (рис.1)

Як показали наші дослідження двох марок матеріалів з різною міцністю, шукані діаметри  $d$  і  $D$  для циліндричних зразків, на яких можна отримати коректне  $K_{IC}$ , виявилися меншими на 15...20% від підрахованих  $D$  і  $d$  за формулами (3), а отримані після значення  $K_{IC}$  практично не відрізнялися між собою, що підтверджує коректність запропонованого підходу на випадок досліджень таких квазікрихких матеріалів як трубних сталей.

У табл. 1 наведені значення  $K_{IC}$ , отримані на малогабаритних циліндричних зразках інваріантних діаметрів, що задовольняють нерівність  $\sigma^* \leq \sigma_{0,2}$  для досліджених матеріалів. Для порівняння вказані величини  $K_{IC}$  після випробувань великогабаритних циліндричних зразків. З метою отримання достовірних значень  $K_{IC}$  зразки із сталі 17Г1С досліджувались при температурі 230К [8], а сталі У8 – при кімнатній температурі (293К).

Таблиця 1 – Геометричні та механічні параметри зразків

Марка матеріалу та режим термічної обробки	$D$ , мм	$d$ , мм	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{м}$
Сталь 17Г1С, нагрів до 1170К, витримка 1 год, охолодження на повітрі	9,5	5,7	640	445	55,2
	15,2	8,8			57
Сталь У8, нагрів до 1055К, витримка 1 год, охолодження на повітрі	8	4,8	790	520	34
	15	9			33,7

Для оцінки тріщиноотривкості зварних з'єднань з квазікрихких матеріалів пропонується конструкція малогабаритного циліндричного зразка (рис.3), який має основу 1 підвищеної міцності та твердості з зовнішньою кільцевою канавкою 2, яку заповнюють досліджуванним матеріалом, кільцевий надріз 3, виготовлений по середині висоти в заповці, та кільцеву тріщину 4, утворену в вершині концентратора.

Вибір зовнішнього діаметра такого зразка для визначення  $K_{IC}$  матеріалу зварного з'єднання встановлюють, виходячи з підрахунку довжини пластичних зон (ізоклин), спрямованих під кутом  $72^\circ$  до площини тріщини (рис 4а). Згідно [9] для забезпечення умов автономності зони передруйнування їхню довжину можна підрахувати за формулою

$$l^* = 0,184 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \quad (7)$$

Тоді приріст тріщини  $x_0$  з врахуванням довжини пластичних зон  $l^*$  можна знайти із такого співвідношення:

$$x_0 = l^* \cdot \cos 72^\circ \quad (8)$$

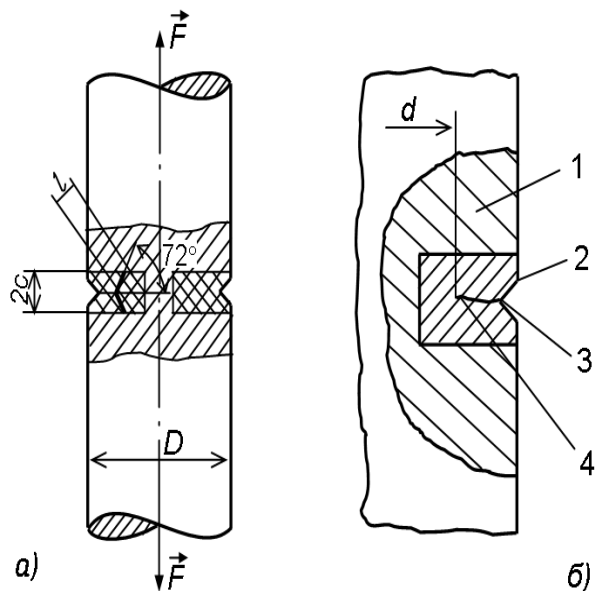


Рис.3. Схема осьового навантаження циліндричного зразка з кільцевою тріщиною в матеріалі заповці і форма пластичної зони у вершині тріщини (а) та його конструктивні елементи (б)

Задавшись висотою виточки, наприклад,  $2c = 3$  мм і відносним розміром кільцевої тріщини  $\varepsilon = d/D = 0,6$ , для якого  $x_0 \leq 0,035d$ , підраховують зовнішній діаметр циліндричного зразка з нерівності

$$C \leq 0,35 \cdot 0,6D \cdot \operatorname{tg} 72^\circ, \quad (9)$$

звідки  $D \geq 20$  мм буде достатнім діаметром зразка для коректного визначення  $K_{IC}$  заплавленого матеріалу зварного з'єднання.

Разом з тим, оскільки матеріал основи міцніший і твердіший, ніж заплавка, пластична зона, яка виникає у вершині кільцевої тріщини в процесі осьового розтягу циліндричного зразка, обмежується висотою наплавки.

Отже, моделювання роботи квазікрихкого матеріалу в об'ємі твердого створює сприятливі умови для реалізації крихкого руйнування матеріалу заплавки за рахунок максимального стиснення пластичних деформацій спереду фронту кільцевої тріщини у зразку.

Перевірку цього підходу виконано на матеріалі високовуглецевої сталі У8. З прутка  $\varnothing 22$  мм нарізали заготовки довжиною 200 мм і центрували з двох

торців. На їх середині виточували кільцеву канавку висотою 3 мм і глибиною до  $\varnothing 5$  мм, яку заплавляли аргонодуговим зварюванням присадковим матеріалом (одну партію сталлю 17Г1С, другу – сталлю 20). Потім шліфували зовнішню поверхню циліндра до  $\varnothing 20$  мм, нарізали V-подібний кільцевий концентратор посередині висоти заплавки до  $\varnothing 18$  мм з радіусом дна  $\rho \approx 0,1$  мм. Кільцевий надріз виготовляли на шліфувальному верстаті шліфувальним кругом. Радіус дна надрізу заміряли радіусомірною головкою на інструментальному мікроскопі МІМ-7.

Режими навантаження для двох партій зразків під час ініціювання кільцевих тріщин вибирали, виходячи з міцнісних характеристик матеріалу заплавки [4]. Діаметр нетто-перерізу зразків з кільцевою тріщиною в заплавці знаходився в межах 16...16,5 мм. Випробування циліндричних зразків на осьовий розтяг здійснювали на розривній машині УМ-5А із швидкістю деформації 0,06 мм/с при температурі 293К. Значення  $K_{IC}$  підраховували за допомогою формул (4), (5) і (6) аналогічно, як і для вихідних матеріалів. Результати випробувань наведені в табл. 2.

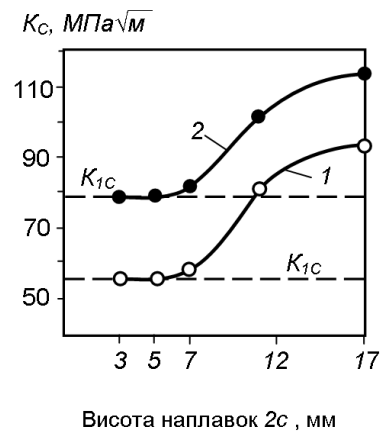
Таблиця 2 – Значення  $K_{IC}$  для зварних з'єднань з кільцевою заплавною

Марка заплавки кільцевої канавки	$D$ , мм	$d$ , мм	$\varepsilon = d/D$	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$K_{IC}$ , МПа $\cdot\sqrt{м}$
Сталь У8, стан поставки, основа, заплавка сталь 17Г1С	20,01	12,11	0,605	600	425	50,2
Сталь У8, стан поставки, основа, заплавка сталь 20	20,01	11,87	0,593	460	270	78,2

Як видно з табл. 2, тріщиноотривкість зварних з'єднань з кільцевою заплавною канавкою циліндричного зразка для сталі 20 вища, ніж для сталі 17Г1С. Разом з тим, значення  $K_{IC}$  зварних з'єднань матеріалу заплавки сталь 17Г1С є меншими від вихідного матеріалу для однорідного циліндричного зразка з тріщиною (табл. 1), що можна пояснити неоднорідністю та відсутністю чистоти структури пришовної зони. Вивчено також вплив висоти наплавки  $2c$  на зміну величини характеристики тріщиноотривкості  $K_C$ . Результати випробувань зразків, виготовлених зі сталі У8 (основа) з висотами наплавки  $2c = 3; 5; 7; 12; 17$  мм із сталей 17Г1С і Ст.20 показано на рис.4.

Видно, що одержані значення  $K_C$  є максимальними для наплавки з висотою  $2c = 17$  мм і мінімальними для  $2c = 3$  мм і 5 мм. В результаті можна стверджувати: якщо  $2c \leq 5$  мм, то  $K_C = K_{IC}$  і є константою

матеріалу наплавки (див. пунктирні лінії на рис.4).



1 – сталь 17Г1С; 2 – сталь 20

Рис. 4. Залежність характеристики  $K_{IC}$  від висоти

Таким чином на основі вищенаведеного можна зробити такі висновки:

1) якщо при підрахунку руйнівного напруження  $\sigma^*$  за формулою (4) на циліндричному зразку з кільцевою тріщиною задовольнятиметься умова  $\sigma^* \leq \sigma_{0,2}$ , то на такому зразку за формулами (5) і (6) можна коректно підрахувати значення  $K_{IC}$  матеріалу, яке є інваріантним до  $K_{IC}$ , встановленого після випробувань великогабаритного циліндричного зразка, для якого діаметри  $D$  і  $d$  визначають за формулою (3). Значення розмірів  $D$  і  $d$ , визначені запропонованим методом є меншими на 15% від рекомендованих;

2) використання циліндричного зразка підвищеної міцності та твердості з кільцевою канавкою (заданої глибини та висоти) для заплавлення в'язкого дослідного матеріалу з ініційованою кільцевою тріщиною в цій заправці дозволяє моделювати роботу в'язкого матеріалу в об'ємі твердого, що реалізує крихке руйнування матеріалу заправки та коректне визначення  $K_{IC}$  для зварного з'єднання;

3) отримані величини  $K_{IC}$  на запропонованих зразках з нормалізованих трубних сталей 17Г1С і Ст.20 після осьового розтягу показали добру збіжність з результатами випробувань стандартних зразків.

1. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. – М.: Мир, 1972. –

наплавок 2с

246с. 2. Standard method of test for plane-strain fracture toughness of metallic materials //Annual Book of Standards. –Philadelphia: ASTM E399-74, 1974. – 432p. 3. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. –М.:Изд-во стандартов, 1985. – 62с. 4. Механика разрушения и прочность материалов: Справ.пособие: В 4-х т./Под общей ред. Панасюка В.В.–К.:Наукова думка, 1988. –Т.3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения/ Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – 436с. 5. Панасюк В.В. Механика квази-хрупкого разрушения материалов. – К.:Наук.думка, 1991. –412с. 6. ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.:Держнафтогаз-пром, 2000. –57с. 7. Козут М.С., Лебідь Н.М. Деякі уточнення методики визначення статичної тріщиноотривкості матеріалів//Фіз.-хім. механіка матеріалів.–1997.–№2.–С.123–125. 8. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень/Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онищук, Д.Ю. Петрина//Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ.–2003.–№1(6).–С.6–11. 9. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. –М.:Наука, 1974. –640с.

УДК 658.58:621.165

## МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ЗНОШЕННЯ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА ГПА НА ОСНОВІ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

© Дубровський В. В., 2004  
НДПІАСУтрансгаз (м. Харків)

© Ільченко Б. С., Хрїтін А. Г.

НДЦ діагностування і оптимального керування експлуатацією газоперекачувального обладнання  
НДПІАСУтрансгаз (м. Харків)

**Описано метод визначення величини зношення ущільнення покривного диску, його впливу на функціонально-технічні характеристики відцентрового нагнітача природного газу магістрального газопроводу. Наведено результати апробації методу в умовах експлуатації**

Для економічної і надійної експлуатації газоперекачувального обладнання необхідно знати фактичні функціональні параметри режиму роботи як

газоперекачувального агрегату (ГПА) в цілому, так і його основних агрегатів: газотурбінної установки (ГТУ) і відцентрового нагнітача (ВЦН). Одним з