

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОСТУ КОРОТКИХ ВТОМНИХ ТРІЩИН У ТРУБАХ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Т.П. Венгринюк, О.Т. Цирульник

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 40534,
e-mail: koreyb@pimg.edu.ua

На основі використання підходів механіки втомного руйнування встановлено особливості росту коротких тріщин у сталі 17Г1С магістрального газопроводу без та після експлуатації впродовж 34 років. Описано методику отримання коротких втомних тріщин та визначення для них порогового розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень. Експериментально показано вплив закриття втомних тріщин за прояв феномену коротких тріщин. Обчислено границю втоми для металу з короткими тріщинами та наведені залежності порогу втоми і границі втоми від довжини тріщини. Вказано на високу ефективність нанесення розробленого ізоляційного покриття і з огляду підвищення циклічної тріщиностійкості металу труби.

Ключові слова: втомний ріст тріщин, короткі тріщини, закриття тріщин, границя втоми, ізоляційне покриття, гальмування тріщини

По результатам использования подходов механики усталостного разрушения установлены особенности роста коротких трещин в стали магистрального газопровода до и после эксплуатации продолжительностью 34 года. Описаны методики получения коротких усталостных трещин и расчете их порогового размаха коэффициента интенсивности напряжений. Экспериментально показано влияние закрытия усталостных трещин на проявление феномена коротких трещин. Вычислено границу усталости для металла с короткими трещинами и приведены зависимости порога усталости и границы усталости от длины трещины. Показано высокую эффективность нанесения разработанного изоляционного покрытия и с точки зрения повышения циклической трещиностойкости металла трубы.

Ключевые слова: усталостный рост трещин, короткие трещины, закрытие трещин, граница усталости, изоляционное покрытие, торможение трещины

The peculiarities of short crack growth in main gas pipeline 17G1S steel before and after its service during 34 years are established on the base of fatigue fracture mechanics approaches. The methods of obtaining of short fatigue cracks and evaluation for them the threshold range of stress intensity factor are described. It is experimentally shown an responsibility of fatigue crack clousure for the manifestation of short crack phenomenon. Fatigue limit for the metal with short crack is calculated and the dependencies of fatigue threshold and fatigue limit on crack length are put. The high effectiveness of the developed isolation coating is shown from the point of an increasing of fatigue crack growth resistance on the stage of fatigue short crack propagation.

Keywords: fatigue crack growth, short cracks, crack clousure, fatigue limit, isolation coating, crack arrest

Аналіз роботоздатності та розрахунків залишкової довговічності магістральних трубопроводів часто проводять із врахуванням закономірностей втомного росту тріщин [1-3]. Це зумовлено як високочастотною зміною навантаження від внутрішнього тиску у трубі, особливо за компресорними станціями, так і періодичними змінами режимів експлуатації, аж до зупинок у транспортуванні газу. Зазначимо, що увага до втомного росту тріщин у трубних сталях не відкидає важливості врахування чинника тривалого статичного навантаження у процесах руйнування, особливо за дії корозивно-агресивних середовищ, тобто корозійного розтріскування. Водночас, циклічне навантаження може не тільки зумовлювати окремий механізм руйнування, але і підсилювати корозійне розтріскування сталей. Адже відомо, що тріщини корозійного розтріскування тупіші за втомні, часто розгалужені, що утруднює їх ріст через зниження концентрації напружень. В той же час циклічне навантаження, навіть якщо воно не тривале, буде загострювати такі тріщини і сприяти їх росту.

Обстеження і контроль магістральних газопроводів дають можливість виявляти тріщи-

ни завдовжки 1 мм і навіть менші. Такі тріщини у механіці втомного руйнування відносять до розряду так званих коротких тріщин (КТ), які за однакового розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK ($K_{\max} - K_{\min}$) ростуть з набагато швидше, ніж довгі тріщини, які зазвичай вирощують на лабораторних зразках для оцінювання опірності металу руйнуванню. Таку особливість КТ пов'язують з ослабленням закриття тріщин (ЗТ), явища передчасного контакту берегів тріщини у напівциклі розвантаження [4, 5]. Воно зменшує циклічну деформацію матеріалу у вершині тріщини і, тим самим, розмах деформацій, який виступає механічною рушійною силою втомного росту тріщини. Оскільки перехід до КТ супроводжується зменшенням ЗТ, то при цьому за однакового розмаху ΔK зростає рушійна сила росту тріщини, що прискорює її поширення.

З іншого боку, тривала експлуатація магістральних трубопроводів зумовлює деградацію механічних властивостей матеріалу у об'ємі стінки труби, найістотніше, характеристик опору крихкому руйнуванню [6]. Це стосується і циклічної тріщиностійкості трубних сталей [2], тобто можна очікувати негативного прояву не

тільки явища КТ, але і експлуатаційної деградації металу газопроводів.

Дана робота присвячена вивченню особливостей росту втомних КТ у сталі 17Г1С у вихідному стані (метал труби запасу) і експлуатованого 34 роки магістрального газопроводу, визначенню границі втоми експлуатованого і не експлуатованого металу зі врахуванням наявності коротких тріщин, а також вивченню можливостей їх гальмування нанесенням захисного композитного покриття [7].

Циклічну тріщиностійкість металу визначали за кімнатної температури на повітрі при частоті циклів навантаження $f = 10$ Гц та асиметрії $R = 0,05$. Використовували балкові зразки (шириною 9 мм, висотою 15,2 мм, довжиною 160 мм, орієнтовані у поздовжньому напрямі труби з шириною зразка по товщині стінки труби) з крайовим надрізом, які навантажували за схемою консольного згину. Під час експерименту розмах навантаження ΔF підтримували постійним або ж змінювали згідно вимог [8, 9] з невеликим кроком, визначаючи приріст довжини тріщини Δa за певну кількість циклів ΔN . Довжину тріщини заміряли за допомогою мікроскопа МПБ-2 з точністю 0,01 мм. Будували кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) – залежності швидкості росту втомної тріщини da/dN від ΔK . Порогові значення розмаху КІН ΔK_{th} визначали за швидкістю росту тріщини $\sim 10^{-10}$ м/цикл шляхом поступового ступінчастого зниження розмаху навантаження.

Ефект ЗТ враховували, реєструючи діаграму зміни в циклі навантаження зусилля на зразку F і взаємного переміщення країв берегів тріщини на рівні її вершини [5] та визначаючи ефективний розмах $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl}$, де K_{cl} – рівень КІН, який відповідає закритій (через ефект ЗТ) частині циклу навантаження. Кількісно ефект ЗТ оцінювали коефіцієнтом закриття тріщини U :

$$U = \frac{K_{max} - K_{cl}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} \quad (1)$$

Отримані дані використовували для побудови ефективних КДВР у координатах $da/dN - \Delta K_{eff}$, з якої визначали ефективний пороговий розмах КІН $\Delta K_{th eff} = K_{max th} - K_{th cl}$.

Використали таку методику отримання коротких тріщин, для яких застосовна механіка руйнування. На зразку вирощували звичайним способом втомну тріщину довжиною більше 2 мм, не беручи до уваги глибину концентратора і вважаючи, що ефект коротких тріщин повинен проявитися за меншої довжини. Після отримання такої тріщини при рівні $\Delta K \sim \Delta K_{th}$ визначали коефіцієнт U і періодично на електроіскровому верстаті виконували вздовж тріщини проріз шириною 0,2 мм і висотою, мен-

шою довжини тріщини a , як показано на рис. 1. За найглибшого прорізу залишалася тріщина довжиною $\sim 0,3$ мм, реєстрована на бокових поверхнях зразків. Оскільки ширина прорізу була не більшою за довжину тріщини, то згідно постулатів механіки руйнування за a можна приймати сумарну довжину фізичної тріщини і глибини концентратора та прорізу. Таким чином, процедура нанесення на зразок прорізу не повинна була впливати на напружений стан в околі тріщини, який описується параметром КІН. Крім того, зона термічного впливу від електроіскрового оброблення становила лише 0,2 мм від поверхні прорізу, що не допускало змін стану металу у вершині тріщини, довжина якої була не меншою 0,3 мм.

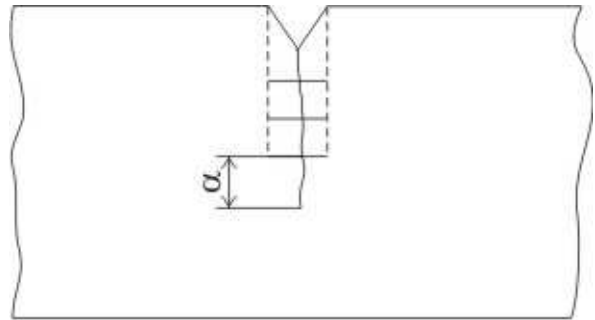


Рисунок 1 – Схема виконання на зразку прорізу електроіскровим методом з метою отримання тріщини різної довжини

На рис. 2 зображено отримані експериментальні КДВР, побудовані з використанням звичайних (довгих) тріщин, а в табл. 1 – кількісні значення порогових показників циклічної тріщиностійкості. Зазначимо значний ефект ЗТ, що загалом властиво для сталей підвищеної пластичності. Він максимальний для припорогових ділянок КДВР, при цьому КІН $K_{th cl}$ складає приблизно дві третини номінального розмаху $\Delta K_{th eff}$.

Тривала експлуатація незначно зменшила циклічну тріщиностійкість сталі, якщо судити за зміщенням номінальних КДВР $da/dN - \Delta K$ для двох станів сталі. Одночасно з тим, підвищився ефект ЗТ; коефіцієнт U зменшився від 0,39 для вихідного до 0,30 для експлуатованого стану. Це означає, що в останньому випадку менше третини циклу навантаження є «ефективним», тобто впливають на втому матеріалу в околі вершини тріщини.

Істотно впав рівень ефективного порогу $\Delta K_{th eff}$ внаслідок експлуатації трубопроводу (від $3,3 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ до $2,4 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) тобто на 27%. Таким чином, опираючись на зміну ефективного порогу $\Delta K_{th eff}$, можна однозначно стверджувати про експлуатаційну деградацію сталі. Водночас незначна зміна величини ΔK_{th} по-

Таблиця 1 – Порогові показники циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С

Стан металу	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$K_{th cl}$, МПа·м ^{1/2}	U	$\Delta K_{th eff}$, МПа·м ^{1/2}
Вихідний	8,4	5,1	0,39	3,3
Експлуатований	8,1	5,7	0,30	2,4

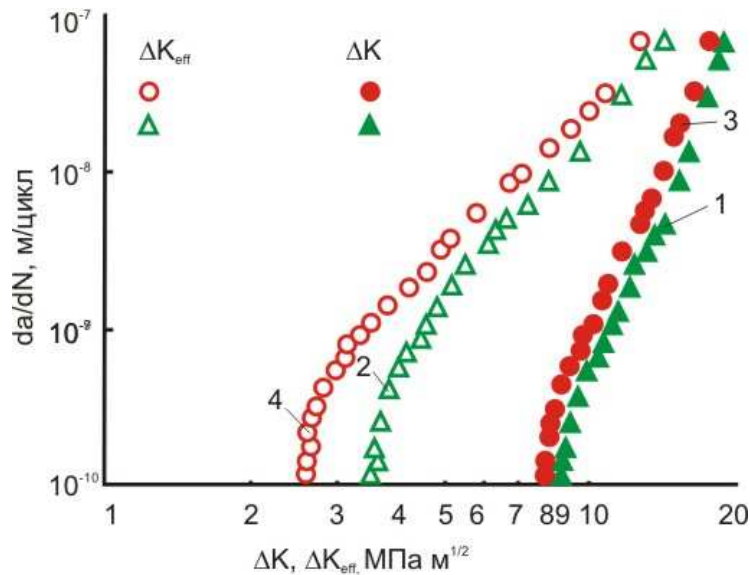
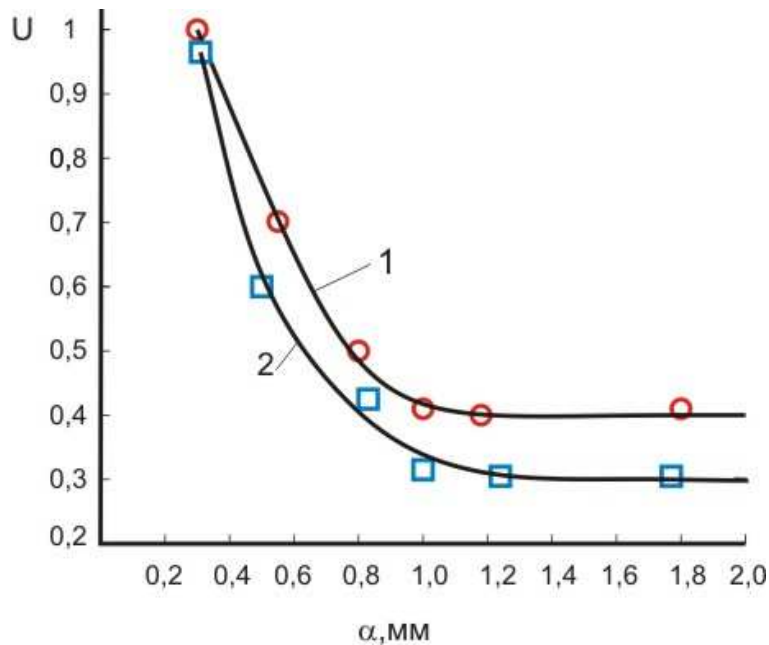


Рисунок 2 – КДВР сталі 17Г1С у вихідному стані (1, 2) і після експлуатації (3, 4) у номінальних (1, 3) і ефективних (2, 4) координатах: асиметрія циклу навантаження $R = 0,05$; $f = 10$ Гц



1 – вихідний стан; 2 – експлуатований стан

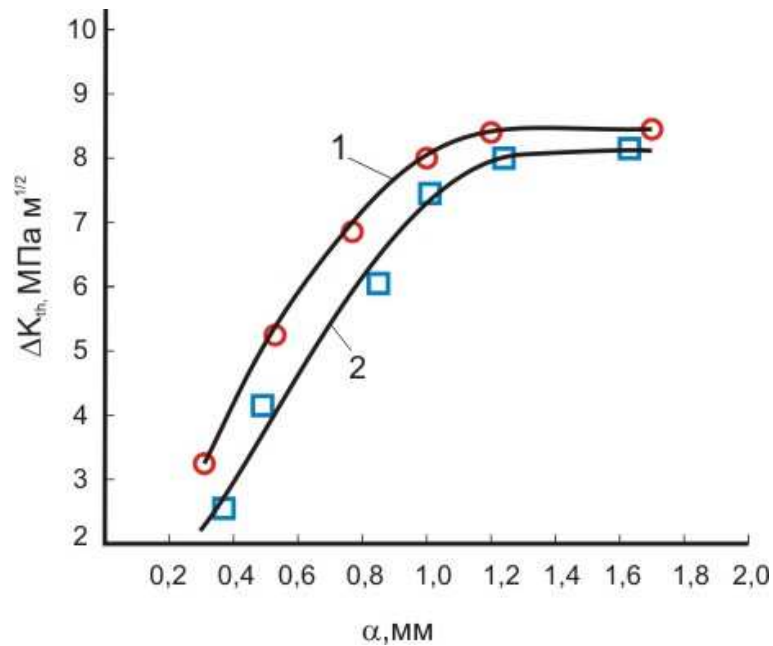
Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта U від довжини тріщини a в діапазоні $a = 0,2 \dots 1,8$ мм для сталі 17Г1С

пояснюється зростанням ефекту ЗТ. Подібні дані отримано іншими дослідниками експлуатаційної та лабораторної деградації конструкційних сталей із залученням ефективних КДВР для оцінювання стану металу, зокрема сталей парогонів ТЕС [10] і корпуса реактора гідрокрекінгу нафти [11].

Оцінки закриття тріщин різної довжини показали (рис. 3), що починаючи приблизно з 1,1...1,2 мм ЗТ знижується зі зменшенням довжини тріщини і за $a \approx 0,3$ мм воно зникає, тобто $U = 1$. Спеціальних відмінностей у залежностях $U - a$ для різних станів сталі не виявлено, якщо не брати до уваги загалом вищий ефект

ЗТ (нижче значення U) для експлуатованої сталі. Таким чином, на конкретному прикладі підтверджено загальні уявлення про зменшення ефекту ЗТ в діапазоні коротких тріщин порівняно з довгими та отримано кількісні оцінки цього ефекту. Так, критичною довжиною a_c , яка відповідає переходу тріщини від короткої до довгої, можна вважати 1,2 мм.

Для з'ясування впливу довжини a в діапазоні коротких тріщин на пороговий розмах КІН ΔK_{th} провели наступний експеримент. Зразки з короткими тріщинами, підготовлені за процедурою, представленою на рис. 1 (тобто після нанесення прорізу і заміру ЗТ), піддавали ба-



1 – вихідний стан; 2 – експлуатований стан

Рисунок 4 – Залежності ΔK_{th} – a для сталі 17Г1С

гатоциклового навантаження за тих же експериментальних умов, за результатами яких будували КДВР. Особливість експерименту полягала у прикладанні навантаження, за якого величина ΔK була б набагато меншою ΔK_{th} , а при довжині $a \sim 0,3$ мм навіть меншою за $\Delta K_{th\text{ eff}}$. Початкова величина навантаження вибиралася заздалегідь такою, щоб тріщина не починала поширюватися. Тоді ступінчато (на 10-15%) підвищували навантаження (і, відповідно, ΔK) до початку попередньо підготовленої в такий спосіб тріщини. Враховуючи чутливість реєстрації приросту довжини тріщини 0,01 мм, на кожній ступені навантаження кількість циклів становила $2 \cdot 10^5$, що би давало змогу зареєструвати приріст тріщини 0,02 мм, якщо би тріщина росла з пороговою швидкістю 10^{10} м/цикл. Якщо тріщини за таких умов не виявляли, то підвищували навантаження на черговий рівень аж до виявлення приросту тріщини. За навантаженням старту тріщини обчислювали пороговий рівень ΔK_{th} .

Максимальні значення ΔK_{th} отримані для тріщин, довжина яких більша критичної $a_c = 1,2$ мм, а мінімальні - експериментально встановленим ефективним порогом $\Delta K_{th\text{ eff}}$ відповідно для кожного стану сталі (рис. 4). Таким чином, підтверджено відповідальність ЗТ за ефект КТ. При цьому для тріщин з $a \sim 0,3$ мм поріг циклічної тріщиностійкості складає лише приблизно третини від ΔK_{th} для довгих тріщин.

Визначали границю втоми матеріалу у вихідному і експлуатованому станах з використанням підходів механіки руйнування та врахування ефекту ЗТ. У праці [12] описано процедуру методу, який полягає у вирощенні від концентратора напружень (геометричного надрізу) пульсівним стисненням ($R = - \sim$) короткої втомної тріщини з наступним ступінчастим на-

вантаженням пульсівним чи близьким до того розтягом. Тоді тріщина почне поширюватися за деякого рівня ΔK , який є пороговим ΔK_{th} для даної довжини a . Цей приріст тріщини в межах діапазону коротких тріщин зумовлює зростання ЗТ і, відповідно, для її подальшого росту з пороговою швидкістю необхідний вищий рівень навантаження, а звідси і ΔK , що відображає збільшення порогу втоми зі збільшенням довжини тріщини. Таким чином будують так звані R-криві втоми як залежності ΔK_{th} – приріст тріщини Δa . Тоді, використовуючи відому залежність механіки руйнування

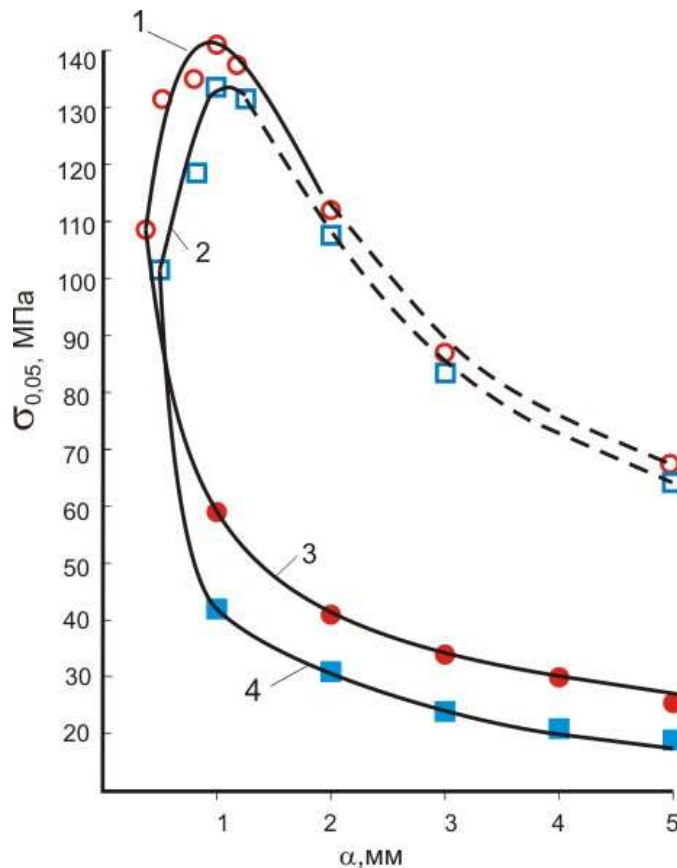
$$K = \sigma (\pi a)^{1/2}, \quad (2)$$

можна за відомим значенням ΔK_{th} визначити границю втоми, виходячи з того, що якщо коротка тріщина не буде розвиватися під час циклічного навантаження, то і елемент конструкції (зразок) не зруйнується.

Нами загалом використано такий підхід до визначення границі втоми, проте короткі тріщини, вирощуванні не стисненням, а виконанням вузькою, шириною 0,2 мм, прорізу вздовж тріщини, як це показано на рис. 1. Перевага нашого методу в тому, що відкидаються можливі сумніви у коректності попереднього вирощування тріщин стисненням, оскільки розподіл залишкових напружень у пластичній зоні такої тріщини складний, відмінний від розподілу напружень при вирощуванні тріщини розтягом. Це може накласти свій відбиток на розподіл напружень при наступному циклічному навантаженні для побудови R-кривої. Проте нами використано залежність (2) для визначення границі втоми металу $\sigma_{0,05}$ (для асиметрії $R = 0,05$) з короткими тріщинами на основі відомих значень ΔK_{th} (табл. 2).

Таблиця 2 – Розраховані значення границі втоми сталі 17Г1С з короткими тріщинами різної довжини

a , мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,05}$, МПа	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,05}$, МПа
0,28...0,32	3,3	108	2,4	78
0,48...0,52	5,2	131	4,0	101
0,78...0,82	6,8	135	6,2	124
0,99...1,02	8,0	142	7,5	134
1,18...1,22	8,4	136	8,1	132
1,78...1,82	8,4	112	8,1	108
3,0	8,4	87	8,1	84
5,0	8,4	67	8,1	65



1, 3 – вихідний стан; 2, 4 – експлуатований стан;
1, 2 – для пульсівного навантаження ($R \sim 0$); 3, 4 для підвищеної асиметрії R

Рисунок 5 – Залежності $\sigma_{0,05} - a$ для сталі 17Г1С

Отримані експериментальні і розрахункові дані дають можливість побудувати залежність границі втоми $\sigma_{0,05}$ від довжини тріщини (табл. 2, рис. 5). При загалом однаковій закономірності зміни $\sigma_{0,05}$ від a зазначимо дещо нижчі значення границі втоми для експлуатованого стану досліджуваної трубної сталі.

Немонотонність кривих $\sigma_{0,05} - a$ демонструє протидію двох чинників у міру зростання тріщини: зростання КІН, тобто напруженого стану у вершині тріщини, а з іншого боку – збільшення ЗТ, що зменшує розмах циклічних напружень. До $a = 1$ мм вплив другого чинника вагоміший, і границя втоми зростає, за довшої

тріщини – границя втоми зменшена, що вкладається у розуміння зниження конструктивної міцності зі збільшенням a .

Беручи до уваги, що пік зростання границі втоми зумовлений явищем ЗТ, цього позитивного ефекту не слід очікувати за високої асиметрії навантаження, коли ЗТ відсутнє. Тому в розрахунках міцності і довговічності трубопроводу, що базуються на багатоциклового навантаженні за підвищеної асиметрії (пульсація тиску у трубі), треба користуватися значеннями границі втоми, які визначаються із залежності

$$K_{th\,eff} = \sigma (\pi a)^{1/2}. \quad (3)$$

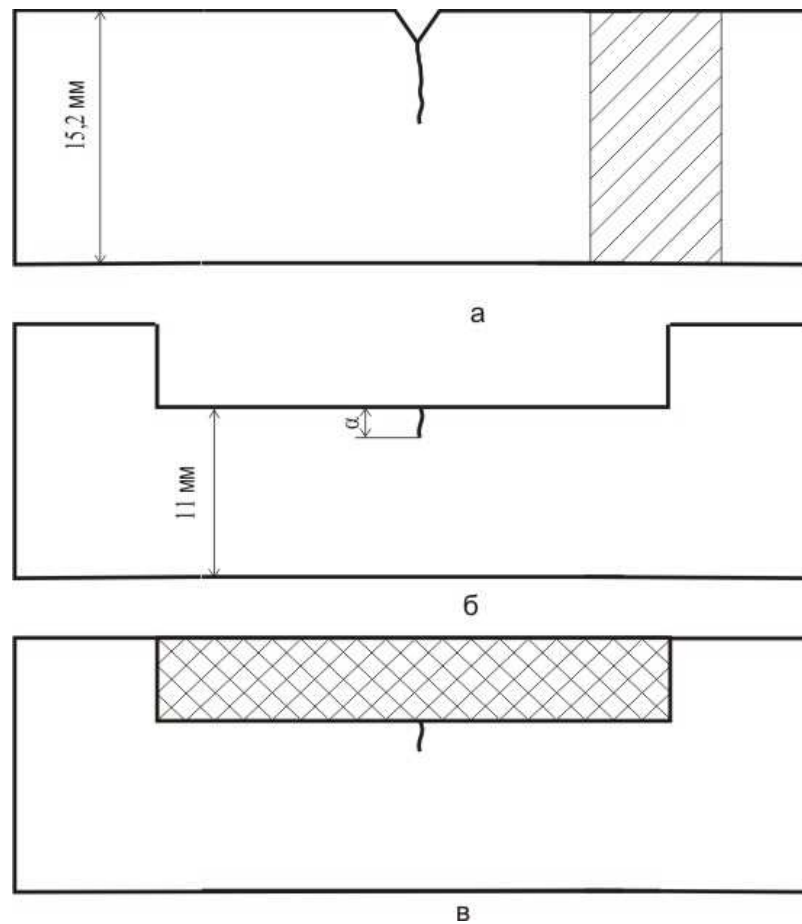


Рисунок 6 – Схема приготування зразка з покриттям і короткою тріщиною під ним для подальших випробувань на втомну міцність

У нашому випадку $\Delta K_{th\,eff} = 3,3$ і $2,4$ МПа·м^{1/2} відповідно для вихідного і експлуатованого металів, а відповідні цим значенням $\Delta K_{th\,eff}$ залежності $\sigma_{0,05} - a$, які відповідають відсутності ЗТ, подано на рис. 5 (криві 3 і 4). В діапазоні довгих тріщин вони відбивають ефект ЗТ, тобто вказують наскільки ефективний поріг циклічної тріщиноустійкості $K_{th\,eff}$ є менший за номінальний K_{th} . А оскільки вони відрізняються майже у тричі, то отримано такі низькі величини границі втоми, якщо враховувати, що за високої асиметрії навантаження ЗТ відсутнє.

Проведено оцінювання ефективності нанесення розробленого ізоляційного композитного покриття трубопроводів згідно з технічними умовами ТУ У 26.1-02070855-003:2010 з огляду гальмування росту коротких втомних тріщин. Ізоляційне композитне покриття є конструкцією, де на шар епоксидного покриття марки ЕДТ-10П, що складається із епоксидної модифікованої смоли ЕД-10 і модифікованого затверджувача на основі амінів, накладене скловолокно марки Т-10-80. Зверху все покриття двокомпонентною поліуретановою композицією 3м Scotchkote 352: (компонент А (основа) і компонент Б (затверджувача) [13, 14].

Зразки з короткими тріщинами і нанесеним покриттям для подальшого циклічного навантаження готували наступним чином. На балкових зразках вирошували довгі втомні тріщини,

як це показано на рис. 6а. При цьому на заключному етапі рівень ΔK_{th} був близьким до порогового. Потім верхню частину зразка з боку концентратора зішліфовували до висоти 11 мм на довжину 160 мм симетрично відносно концентратора (рис. 6б). Таким чином перерізу робочої частини зразка становив 9 мм x 11 мм, і виходячи з цього, обчислювали значення КІН при подальшому навантаженні. Після цього зразок навантажували до рівня $K_{max} = K_{max\,th}$ ($K_{max\,th} = \Delta K_{th}/(1-R)$) і, витримуючи його під тривалим статичним навантаженням, наносили на робочу верхню частину зразка покриття товщиною 4,2 мм, так що загальна висота зразка з покриттям становила 15,2 мм (рис. 6в). Час витримання зразка під навантаженням складав одну добу, що гарантувало за той час повне формування покриття з відповідними функціональними властивостями.

Причиною нанесення покриття на навантажений зразок є. По-перше, часто технологічно вигідно наносити ізоляційне покриття на трубу під тиском, тобто не виводити трубопровід з експлуатації. По-друге, наявні в трубі поверхневі тріщини розкриватимуться в результаті навантаження від внутрішнього тиску, і епоксидна смола, як перший шар покриття, буде частково заповнювати порожнину тріщини, і після затвердіння виконуватиме роль клина. Це за циклічного навантаження зменшує циклічну

Таблиця 3 – Циклічна тріщиностійкість зразків з короткими тріщинами на сталі 17Г1С з нанесеним та без ізоляційного покриття

a, мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$\Delta K_{th}^{покp}$, МПа·м ^{1/2}	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$\Delta K_{th}^{покp}$, МПа·м ^{1/2}
0,28...0,32	3,3	5,7	2,4	5,3
0,48...0,52	5,2	7,5	4,0	7,1
0,78...0,82	6,8	9,8	6,2	9,3
0,99...1,02	8,0	10,7	7,5	10,1
1,18...1,22	8,4	11,8	8,1	11,5

Таблиця 4 – Границя втоми зразків з короткими тріщинами на сталі 17Г1С з нанесеним та без ізоляційного покриття

a, мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	$\sigma_{0,05}$, МПа	$\sigma_{0,05}^{покp}$, МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,05}$, МПа	$\sigma_{0,05}^{покp}$, МПа·м ^{1/2}
0,28...0,32	108	186	78	173
0,48...0,52	131	189	101	179
0,78...0,82	135	196	124	186
0,99...1,02	142	191	134	181
1,18...1,22	136	192	132	187

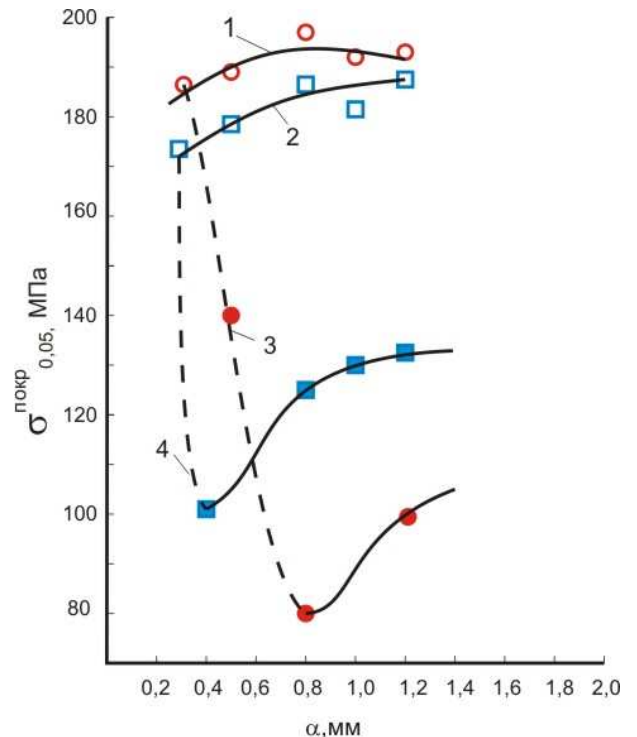
деформацію матеріалу в околі вершини тріщини і тим самим, підвищує опір поширенню втомною тріщини. Фактично штучно створюється ефект закриття тріщини, а такий спосіб гальмування втомного росту тріщин відомий [15].

Приготовлений у такий спосіб зразок піддавали циклічному навантаженню при $f = 10$ Гц та $R = 0,05$. Проведено серію таких експериментів з короткими тріщинами різної довжини. Зразок-композит ступінчасто навантажували так, щоб на першій ступені рівень ΔK був дещо вищим за ΔK_{th} для тріщини даної довжини (рис. 4). Кількість циклів – $2 \cdot 10^5$. Якщо тріщина не проростала за цих умов, про що судили за спостереженнями бокових поверхонь зразка, навантаження підвищували на 10-15 % і зразок піддавали циклуванню впродовж наступних $2 \cdot 10^5$ циклів. Експерименти з підвищенням навантаження тривали до виявлення росту тріщини на бокових поверхнях. Тоді відповідно до силових умов циклічного навантаження обчислювали порогове значення $\Delta K_{th}^{покp}$, властиве зразку з втомною тріщиною конкретної довжини a та з нанесеним покриттям. За різницею між значеннями ΔK_{th} для вихідного (без покриття) і зміцненого $\Delta K_{th}^{покp}$ зразка визначали кількісно ефект від застосування покриття. Результати досліджень зведено в табл. 3.

За аналогією з розрахунком границі втоми $\sigma_{0,05}$ для коротких тріщин різної довжини визначено відповідні значення $\Delta K_{th}^{покp}$ величини границі втоми металу з короткими тріщинами з використанням ізоляційного покриття ($\sigma_{0,05}^{покp}$). Результати обчислень зведені до табл. 4.

На рис. 7 зображено залежності $\sigma_{0,05}^{покp} - a$, які вказують на істотний вплив нанесення покриття на втомну міцність зразків з короткими тріщинами. Ефект зміцнення дещо зростає зі збільшенням довжини тріщини, проте не так різко, як без покриття (див. рис. 5). Зазначимо,

що хоча втомна міцність експлуатаційно деградованого металу залишається нижчою за міцність металу у вихідному стані, ця різниця зменшується, тобто нанесення покриття є дещо ефективнішим у використанні для тривало експлуатованої труби.



1 – вихідний стан; 2 – експлуатований стан; 1, 2 – для пульсівного навантаження ($R = \sim 0$); 3, 4 для підвищеної асиметрії R

Рисунок 7 – Залежності $\sigma_{0,05}^{покp} - a$ для сталі 17Г1С

Висновок

Наведено залежності границі втоми від довжини тріщини, які відбивають ефект коротких тріщин для різної асиметрії навантаження. Для навантаження, близького до пульсівного, за загальної тенденції зниження границі втоми зі збільшенням довжини тріщини спостерігається зростання границі втоми у вузькому діапазоні коротких тріщин, що зумовлено ефектом ЗТ. Для навантаження з підвищеною асиметрією циклу властива монотонна закономірність зниження границі втоми зі збільшенням довжини тріщини. Тривала експлуатація газопроводу проявилася у зниженні границі втоми металу за збереження наведених вище загальних закономірностей. Завдання наступних досліджень полягає в експериментальній перевірці ефективності нанесення захисного покриття для гальмування росту різних довжин тріщин.

Література

1 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: науково-технічний посібник / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під ред. В.В. Панасюка. У 3-х т. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 457 с.

2 Красовський А.Я. Оценка остаточного ресурса магистрального трубопровода, поврежденного стресс-коррозией / А.Я. Красовський, И.В. Лохман, И.В. Орыняк // В сб. «Остаточный ресурс и проблемы модернизации магистральных и промышленных трубопроводов». – К.: ООО «Центр трансфера технологий «Институт электросварки им. Е.О. Патона», 2011. – С. 4–7.

3 Банахевич Ю.В. Прогнозування залишкової міцності і довговічності ділянок нафтогазопроводів з дефектами за експлуатаційних умов: автореф. дисерт. докт. техн. наук / Банахевич Ю.В. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 41 с.

4 Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension // Eng. Fract. Mech. – 1970., № 1. – P. 37–45

5 Романив О.Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, Б.Н. Андрусив // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – № 3. – С. 47–61.

6 Крижанівський Є.І. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин // Физ.-хим. механика материалов. – 2011. – № 2. – С. 11–20.

7 Копей Б.В. Спосіб попередження розвитку тріщиноподібних і корозійних дефектів трубопроводів / Б.В. Копей, Т.П. Венгринюк // Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика-2011», Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011р.). – 2011. – С. 82.

8 РД 50–345–82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов. – 1983. – 96 с.

9 Yarema S.Ya. The method for determination of crack growth rate and crack extension resistance under cyclic loading // Lviv: National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-Mechanical Institute. – 1994. – 80 p.

10 Никифорчин Г. Оцінка методами механіки руйнування високотемпературної водневої деградації сталей енергетичного та нафтохімічного обладнання / Г. Никифорчин, О. Студент // В зб. «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій; під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 633–640.

11 Бабій Л.О. Оцінювання властивостей сталей реакторів гідрокрекінгу нафти після високотемпературної водневої деградації: автореф. дис. канд. техн. наук / Бабій Л.О. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2011. – 20 с.

12 Tabernig B., Pippan R. Resistance curves for the threshold fatigue crack propagation // Proc. of the Symp. "Fatigue Design", Espoo, Finland. – 1998. – P. 127–134.

13 Ізоляційне композитне покриття трубопроводів. Технічні умови (ТУ У 26.1 – 02070855 – 003: 2010). [Чинний від 10.06.2011].

14 Заключення на ізоляційне композитне покриття трубопроводів / [КП / Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка]. – 2011. [4] с.

15 Новый способ повышения циклической трещиностойкости деталей конструкций / Г.Н. Никифорчин, О.Н. Романив, Б.Н. Андрусив и др. // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – № 2. – С. 92–93.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
22.02.12*

*Рекомендована до друку професором
В.Я. Грудзом*