

УДК 539.3:620.178:620.181:620.194

ГАЛЬМУВАННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН НАНЕСЕННЯМ НА ГАЗОПРОВІДИ ПІД ТИСКОМ РЕМОНТНОГО ПОКРИВУ

Т. П. ВЕНГРИНЮК

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Описано додаткові можливості ремонтних ізоляційних покривів у підвищенні довговічності магістральних трубопроводів, нанесених без виведення їх з експлуатації. Особливість полягає у гальмуванні подальшого поширення поверхневих втомних тріщин штучним створенням ефекту їх закриття, яке досягають, заповнюючи порожнину тріщини рідкоплинною епоксидною смолою. Після тверднення вона виконує роль клина, зменшуючи розмах циклічних пластичних деформацій в околі вершини тріщини, тобто механічну рушійну силу її втомного розвитку. За експериментальними результатами проаналізовано механічну ситуацію у вершині тріщини з використанням цього способу її гальмування.

Ключові слова: *трубопровід, сталь, втомна тріщина, ізоляційний покрив, закриття тріщини, реверсивна пластична деформація, підвищення довговічності.*

Нанесення захисних ізоляційних покривів на магістральні нафтові та газові трубопроводи – один з основних методів протикорозійного захисту, що запобігає безпосередньому контакту агресивного ґрунтового середовища з металом труби. За тривалої експлуатації покриви можуть втрачати свої захисні властивості, що вимагає ремонтних робіт з їх заміни. Ефективним вважають ремонт без виводу трубопроводу з експлуатації, тобто коли роботи виконують на трубі під тиском [1, 2].

З іншого боку, за тривалої експлуатації на зовнішній поверхні трубопроводу можуть утворюватися тріщини механічної чи корозійно-механічної природи, особливо у місцях порушення функціональних властивостей ізоляційних покривів. Тому важливо не тільки захистити метал зовнішньої поверхні труби від агресивної дії ґрунтового середовища, але й загальмувати розвиток вже існуючих тріщин. Нижче розкрито спосіб гальмування росту втомних тріщин штучним створенням ефекту закриття тріщини (ЗТ) під час нанесення на трубопровід розробленого ремонтного ізоляційного покриву [3], що складається із епоксидної смоли марки ЕД-10 із затверджувачем, скловолокна марки Т-10-80 і поліуретанової композиції 3m Scotchkote 352.

Спосіб ґрунтується на відомому методі [4] підвищення циклічної тріщиностійкості матеріалів заповненням порожнини тріщини матеріалом, здатним виконувати роль твердого клина, а отже, перешкоджати переміщенню її берегів під час циклічного навантаження, що, по суті, створює ефект ЗТ [5]. Тоді зменшується розмах циклічних деформацій в околі вершини тріщини, тобто послаблюється механічна рушійна сила її росту. Використовуючи дефініції механіки втомного руйнування, так можна зменшити ефективний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) ΔK_{eff} , і якщо він нижчий порогового розмаху КІН $\Delta K_{th\ eff}$, то тріщина повністю гальмується, тобто не поширюється.

Зазначимо, що на поверхні трубопроводів можуть утворюватися і втомні тріщини, і тріщини корозійного розтріскування, які розвиваються під тривалим статичним навантаженням. Запропонований спосіб придатний для гальмування тіль-

ки втомних (корозійно-втомних) тріщин, для яких механічною рушійною силою є розмах ΔK_{eff} . Його реалізують, наносячи покрив на трубопровід під тиском, що є необхідною умовою, оскільки тоді робочі напруження розкривають існуючі тріщини, в які надходить матеріал покриву (епоксидна смола) з рідкоплинними властивостями. Інша необхідна умова – перебування труби під тиском до повного затверднення матеріалу, який потрапив у тріщини, і за подальшого розвантаження трубопроводу протидіятиме зближенню їх берегів (в ідеальному випадку повного заповнення порожнини тріщини затверділий матеріал за відсутності усадки перебуватиме у стані всебічного стиску і деформуватиметься тільки пружно), тобто зменшуватиметься розмах ΔK_{eff} .

Зазначимо, що методами неруйнівного контролю можна виявляти тріщини глибиною до 1 mm, які в механіці втомного руйнування відносять до т.зв. коротких де відсутнє закриття, тобто рівень ΔK_{eff} відповідає номінальному розмаху ΔK , і цей феномен відповідальний за пришвидшений ріст коротких тріщин порівняно з довгими. Тому слід очікувати позитивнішого ефекту від заповнення смолою саме коротких тріщин, експлуатацію труб з якими ще допускають.

Досліджували сталь 17Г1С у вихідному стані (метал труби запасу) і експлуатовану 34 роки на магістральному газопроводі. Циклічну тріщиностійкість металу визначали у повітрі за частоти циклів навантаження $f = 10$ Hz та асиметрії $R = 0,05$, навантажуючи балкові зразки $9 \times 18 \times 160$ mm (поздовжні зразки, ширина яких орієнтована по товщині стінки труби) з боковим надрізом згідно з вимогами [6], та встановлювали приріст довжини тріщини Δa за певну кількість циклів. За розвитком тріщини спостерігали за допомогою мікроскопа МПБ-2 з роздільною здатністю 0,01 mm. Ефект ЗТ оцінювали за коефіцієнтом закриття тріщини U , реєструючи діаграму зміни зусилля на зразку і взаємного переміщення берегів тріщини в циклі навантаження [5].

Вивчали припороговий ріст коротких тріщин, для отримання яких вирощували спочатку довгу тріщину. Далі періодично на електроіскровому верстаті виконували вздовж тріщини від концентратора проріз шириною 0,2 mm, зменшуючи так фізичну довжину тріщини аж до $\sim 0,3$ mm. Оскільки ширина прорізу не перевищувала найкоротшу довжину тріщини, то в розрахунках КІН за параметр a можна приймати сумарну довжину фізичної тріщини і глибини концентратора та прорізу. Таким чином, процедура нанесення на зразок прорізу не повинна впливати на напружений стан в околі тріщини.

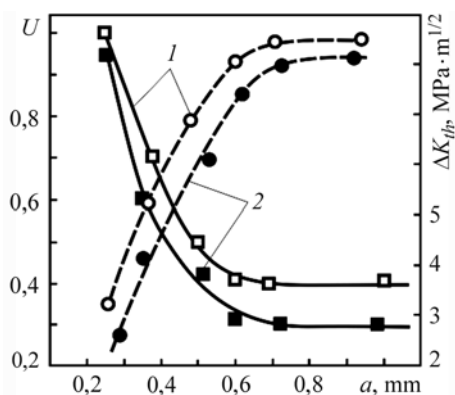
Зі зменшенням довжини тріщини a (починаючи з $a \approx 1,1 \dots 1,2$ mm) ЗТ знижується, а при $a \sim 0,3$ mm зникає ($U = 1$) (рис. 1). Щоб дослідити вплив довжини тріщини на пороговий розмах КІН ΔK_{th} , виконали такий експеримент. Зразки з короткими тріщинами, тобто після нанесення прорізу і заміру ЗТ, піддавали багаточисловому навантаженню, за якого величина ΔK набагато менша за ΔK_{th} , а за довжини $a \sim 0,3$ mm – навіть за $\Delta K_{th,eff}$. Навантажували спочатку так, щоб тріщина не починала поширюватися. Тоді ступенево, на 10...15%, збільшували навантаження до її старту. Чутливість реєстрації приросту довжини тріщини становила 0,01 mm, тому на кожному рівні навантаження кількість циклів була $2 \cdot 10^5$ cycles, що давало змогу зафіксувати приріст тріщини 0,02 mm, якщо би вона поширювалась з пороговою швидкістю 10^{-10} m/cycle. Якщо старту тріщини не фіксували, то піднімали навантаження на черговий рівень аж до виявлення приросту, за яким обчислювали параметр ΔK_{th} та будували залежність $\Delta K_{th}-a$ (рис. 1).

Максимальні значення ΔK_{th} отримані для тріщин, довжина яких перевищувала критичну $a_c = 1,2$ mm, а мінімальні – для $a \sim 0,3$ mm (приблизно третина від значень для довгих тріщин). Побудовані (рис. 1) залежності вказують на відповідальність ЗТ за ефект коротких тріщин. Вони якісно однакові для експлуатованої сталі та металу труби запасу, однак у першому випадку ЗТ інтенсивніше, а поріг

ΔK_{th} дещо нижчий. Це вказує на експлуатаційну деградацію металу за циклічною тріщиностійкістю, яка визначається не лише зростанням ЗТ, що типово для тривало експлуатованих сталей [7].

Рис. 1. Залежності коефіцієнта U (□, ■) та порога ΔK_{th} (○, ●) від довжини тріщини a у діапазоні 0,3...1,8 mm для сталі 17Г1С: 1 – вихідний стан; 2 – експлуатована.

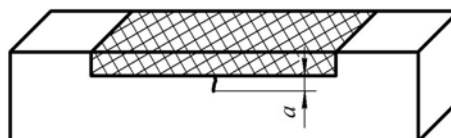
Fig. 1. Dependences of coefficient U (□, ■) and threshold ΔK_{th} (○, ●) on crack length a in the range of 0.3...1.8 mm for 17Г1С steel: 1 – as-received state; 2 – after service.



Оцінили ефективність розробленого покриття для гальмування росту коротких втомних тріщин. На балкових зразках $9 \times 18 \times 160$ mm вирощували довгі втомні тріщини, при цьому на завершальному етапі рівень ΔK наближався до ΔK_{th} . Потім верхню частину зразка від концентратора зішліфовували до висоти 14 mm на довжину 60 mm симетрично до концентратора (рис. 2). Далі зразок витримували під статичним навантаженням, рівним попередньому максимальному в циклі, і наносили на робочу верхню частину покриття за такою процедурою: накладали епоксидну смолу, потім наносили скловолокно, а зверху – поліуретанову композицію. Зразок під цим навантаженням витримували одну добу, що гарантувало формування покриття з відповідними функціональними властивостями.

Рис. 2. Геометрія зразка з короткою тріщиною та нанесеним покриттям (a – довжина тріщини).

Fig. 2. The geometry of specimen with a short crack and with coating (a – crack length).



Визначали порогове значення ΔK_{th}^{coat} , властиве зразку з утомною тріщиною різної довжини a та з нанесеним покриттям (див. таблицю). Для цього його ступенево навантажували, як у попередньому випадку, до виявлення росту тріщини. За різницею у значеннях ΔK_{th} для вихідного (без покриття) і зміцненого ΔK_{th}^{coat} зразка можна робити висновки про ефект від застосування покриття.

Виявлено, що зміцнення покриттям зростає зі зменшенням довжини втомної тріщини незалежно від того, експлуатований чи неексплуатований метал. Зазначимо, що додатково очікують зміцнювальний ефект і від механічної накладки зі скловолокна і поліуретанової композиції з високою адгезією до поверхні металу.

Поріг циклічної тріщиностійкості зразків з короткими тріщинами на сталі 17Г1С з нанесеним ізоляційним покриттям та без нього

a , mm	Вихідний стан		Експлуатована	
	ΔK_{th}	ΔK_{th}^{coat}	ΔK_{th}	ΔK_{th}^{coat}
MPa·m ^{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

Таким чином, одержані експериментальні результати вказують на перспективи технології нанесення ремонтних ізоляційних покриттів на трубопроводах під тиском не тільки для протикорозійного захисту, але і для гальмування росту коротких втомних тріщин. Для ефективної його реалізації важливо забезпечити суттєву рідкоплинність епоксидної смоли для повнішого заповнення розкритих поверхневих тріщин.

РЕЗЮМЕ. Оценены дополнительные возможности ремонтных изоляционных покрытий в повышении долговечности магистральных газопроводов, нанесенных без вывода их из эксплуатации. Особенность метода в торможении дальнейшего распространения поверхностных усталостных трещин искусственным созданием эффекта их закрытия, которое достигается заполнением полости трещины жидкотекучей эпоксидной смолой. После затвердевания она выполняет роль клина, уменьшая размах циклических пластических деформаций в окрестности вершины трещины, т. е. механическую движущую силу ее усталостного развития. По экспериментальным результатам оценена механическая ситуация у вершины трещины с использованием такого способа ее торможения.

SUMMARY. The additional possibilities of repair isolation coatings for the increase of durability of main pipelines without their service stop are shown. The method peculiarity consists in an arrest of further propagation of surface fatigue cracks by forming artificially the crack closure effect, what is achieved by filling in the crack cavity with fluid epoxy resin. After consolidation it performs the role of a wedge thus decreasing the range of cyclic plastic deformations, i.e a mechanical driving force of fatigue crack growth. The analysis of the mechanical situation at the crack tip is carried out using the obtained experimental results applying such a method of the crack arrest.

1. *Махненко В. И., Бут В. С., Олейник О. И.* Ремонт магистральных трубопроводов сваркой без вывода их из эксплуатации // Проблемы прочности. – 2009. – № 5. – С. 86–100.
2. *Крижанівський С. І., Никифорчин Г. М.* Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання // Наук.-техн. пос. у 3-х т. / Під ред. В. В. Панасюка. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 457 с.
3. *Копей Б.В., Архирей В.В., Венгринюк Т.П.* Застосування композиційних матеріалів в нафтовидобувному комплексі // Наук. вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 1. – С. 68–76.
4. *Новый способ повышения циклической трещиностойкости деталей конструкций / Г. Н. Никифорчин, О. Н. Романив, Б. Н. Андрусив и др.* // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – 21, № 2. – С. 92–93.
(*Nikiforchin G. N., Romaniv O. N., Andrusiv B. N. et al.* A new method of increasing the cyclic crack resistance of structural parts // Materials Science. – 1985. – 21, № 2 – P. 191–193.)
5. *Романив О. Н., Никифорчин Г. Н., Андрусив Б. Н.* Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов // Там же. – 1983. – 19, № 3. – С. 47–61.
(*Romaniv O. N., Nikiforchin G. N., Andrusiv B. N.*, Effect of crack closure and evaluation of the cyclic crack resistance of constructional alloys // Ibid. –1983. – 19, № 3. – P. 212–225.)
6. *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.
7. *Correlation between fracture roughness and fatigue threshold of high temperature degraded steel / O. Z. Student, P. Cichosz, J. Szymkowski* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – 35, № 6. – С. 37–42.
(*Student O. Z., Cichosz P., Szymkowski J.* Correlation between the fracture roughness and fatigue threshold of high-temperature degraded steel // Materials Science. – 1999. – 35, № 6. – P. 796–801.)

Одержано 06.08.2012