

УДК 548.39:539.2 УДК 539.375. 669.788

ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛУ ТРУБИ МАГІСТРАЛЬНОГО НАФТОПРОВОДУ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Я. Л. Іваницький

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 79601, м. Львів,
МСП вул. Наукова, 5, тел. (0322) 633088, 637038, e-mail: panasyuk@ah.ipm.lviv.ua

Проведены комплексные исследования влияния долговременной работы трубной стали 17Г2С магистрального нефтепровода Кременчуг-Херсон на изменение механических свойств и характеристик трещиностойкости. Получены изменения механических характеристик стали 17Г2С после длительной эксплуатации. Определены характеристики статической и циклической трещиностойкости стали 17Г2С в нефти материала эксплуатированной и выходной трубы. Предложено инженерную оценку влияния эксплуатационных факторов на степень деградации материала трубы, которая может использоваться для мониторинга технического состояния и определения несущей способности элементов конструкций

Аналіз причин аварій магістральних нафтопроводів свідчить, що високий процент відмовлень пов'язаний з розривами стінки труби по основному металу або по кільцевих стикових швах. Понад 50% конструкцій руйнуються від корозійних пошкоджень, 37% викликані незадовільною якістю металу, що характеризуються недостатньою його пластичністю, неякісними лініями сплавлення, заводських швів і ін. [1, 2].

Впродовж тривалого періоду експлуатації в результаті взаємодії металу труби з нафтою відбуваються поверхневі корозійні процеси, а також об'ємні деструктивні зміни, викликані в першу чергу дифузією водню і окрихненням матеріалу труби [2]. Разом з тим на матеріал труби діє комплекс термосилових напружень статичного і циклічного характеру, внаслідок яких у матеріалі можуть відбуватись структурні зміни і як наслідок зародження поверхневих та внутрішніх дефектів. Ці дефекти можуть спричинити руйнування матеріалу труби. Отже, метою даної роботи є оцінка зміни властивостей матеріалу після довготривалої експлуатації, що є необхідним під час встановлення залишкового ресурсу роботи труби магістрального нафтопроводу.

Для досягнення мети в роботі поряд з класичними підходами використані підходи механіки руйнування, які базуються на визначенні характеристик статичної та циклічної тріщиностійкості матеріалу.

Матеріали та методика експериментів. Досліджували зразки, вирізані із труб магістрального нафтопроводу "Кременчуг-Херсон" після 28 років експлуатації та у вихідному стані (контрольна труба у стані поставки). Матеріал труби – сталь 17Г2С.

Complex researches of influence of long term service of main oil pipeline "Kremenchug-Kherson" made of 17G2S pipe steel on the changes of mechanical properties and fracture toughness were carried out. On the basis of the conducted researches the changes of mechanical characteristics of 17G2S steel after long term service has been established. The characteristics of static and cyclic fracture toughness of 17G2S steel have been determined in oil for the materials of exploited and unexploited pipes. The engineering estimation of operating factors influence on the degree of pipe material degradation, which can be used for monitoring of the technical state and for determination of bearing strength of structural elements, were proposed

Зразки для механічних випробувань характеристик, статичної і циклічної тріщиностійкості виготовляли із верхнього та нижнього фрагментів робочої та контрольної труби (рис. 1) і доводили до необхідних розмірів.

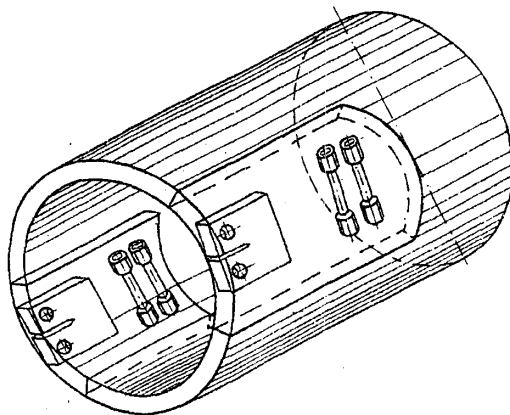


Рисунок 1 - Схема вирізки зразків з труби

Для дослідження механічних характеристик виготовляли стандартні циліндричні зразки з робочим діаметром 5 мм і довжиною 25 мм. Зразки випробовували розтягом у середовищі нафти на дослідній установці EUS-40 згідно з рекомендаціями [3]. На основі проведених досліджень визначали межу текучості σ_T , межу міцності σ_b , відносне видовження δ і відносне звуження ψ . Характеристики статичної та циклічної тріщиностійкості визначали в ході випробування компактних зразків товщиною 12 мм (рис. 2) у середовищі нафти.



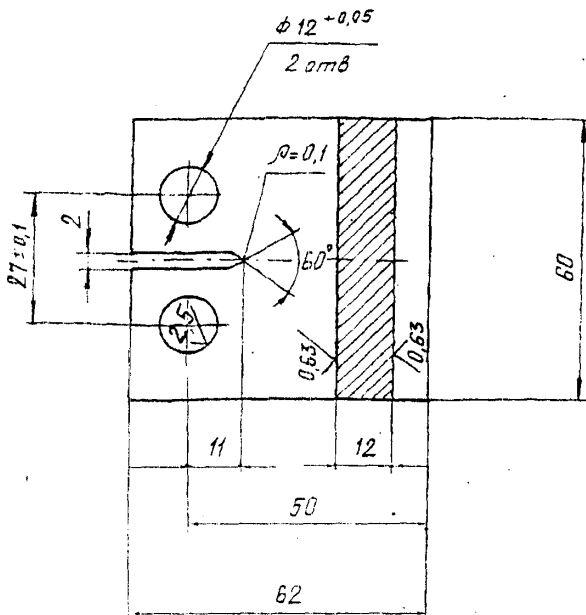


Рисунок 2 - Ескіз компактного зразка на позацифровий розтяг

Для цього у виготовленому зразку (рис. 2) наводять втомну тріщину довжиною 2 мм, дотримуючись рекомендацій [4]. Після цього зразок установлюють у дослідну камеру. Конструктивна схема дослідної камери зображена рис. 3. Камера складається із зварного корпусу 1, до якого нерухомо закріплені нижній затискач 3. Верхній затискач 2 з'єднаний з корпусом камери через сильфон 4. До верхнього і нижнього захоплювачів під'єднані за допомогою різьби перехідники 5 і 6, де безпосередньо закріплені зразок 7 на циліндричних пальцях 8 і 9. До боковини корпусу камери приварений фланець 10 для кріплення оглядового вінка із шклом 11, ущільненого прокладками 12, 13, гайкою 14. Для зливу нафти із камери під час проведення замірювання збільшення тріщини в днищі встановлений кран 15 із патрубком. Заповнення камери нафтою в ході проведенні досліджень здійснюють через розтруб 16 до позначки 17. У момент замірювань довжини зростаючої тріщини в зразку за допомогою катетометра рівень нафти встановлюють на позначці 18.

Дослідження на статичну тріщиностійкість проводять під час розтягу компактного зразка з втомною тріщиною з побудовою діаграми руйнування, дотримуючись рекомендацій [4].

Із діаграми руйнування визначають зусилля P_Q , за якого починає зростати тріщина, і за формулою [4] розраховують величину коефіцієнта інтенсивності (КІН) K_Q

$$K_Q = \frac{P_Q}{i\sqrt{b}} \cdot 13,74(1 - 3,38\lambda + 5,57\lambda)^2.$$

(1)

Тут i – товщина зразка, b – відстань від осі прикладання сили дотичної частини зразка; $\lambda = l/b$ – відносна довжина тріщини.

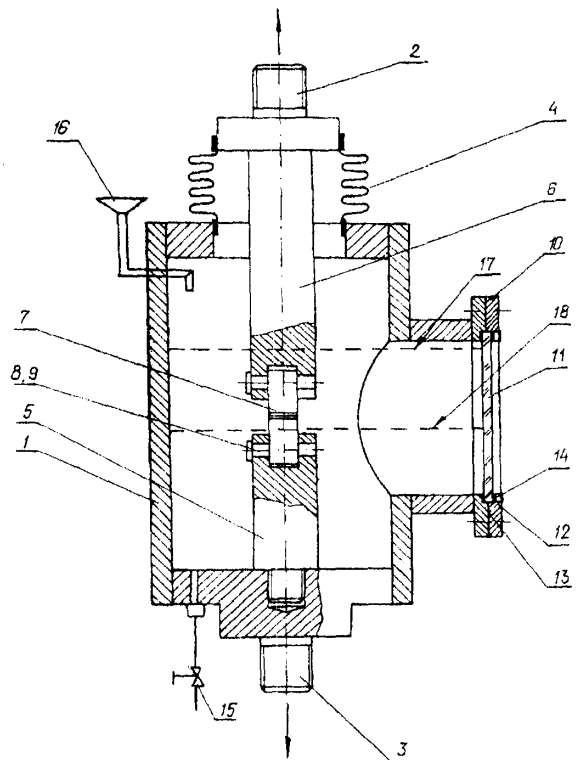


Рисунок 3 - Конструктивна схема камери для випробування зразків на циклічну тріщиностійкість у нафтовому середовищі

Випробування зразків на циклічну тріщиностійкість проводять за асиметричного циклічного розтягу зразка в середовищі нафти і релаксацією зусиль навантаження в циклі та зростанням тріщини, дотримуючись вимог [5]. У результаті експериментів будують кінетичну діаграму втомного руйнування (КДВР), яка виражає залежність швидкості росту тріщини V від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK ($V = f(\Delta K)$). Із КДВР визначають нижнє порогове значення КІН K_{th} , верхнє критичне значення K_{fc} і швидкість поширення втомної тріщини в середній ділянці діаграми і на підставі результатів судять про опірність матеріалу втомному руйнуванню.

Результати експериментальних досліджень, що одержані в ході визначення механічних характеристик матеріалу після тривалої експлуатації (зразки I – II відповідає низу труби, I – В – верхній частині) та вихідної труби (зразки - II) наведені в таблиці 1.

У таблиці 2 наведено результати експериментальних досліджень компактних зразків у нафті та визначено характеристики статичної тріщиностійкості K_Q .

Характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 17Г2С одержані на основі випробування зразків із експлуатованої та вихідної труби у нафті наведено в таблиці 3.



Таблиця 1 - Результати механічних характеристик сталі 17Г2С у нафті

№ зразка	d, мм	R _{max} , Н	R _T , Н	σ _T , Н/мм ²	σ _b , Н/мм ²	δ, %	ψ, %
I - Н 1	5,0	10538	8301	423	537	22,1	39,5
I - Н 2	4,98	10415	8196	421	535	22,3	38,8
I - Н 3	5,02	10612	8366	423	537	22,5	38,9
I - В 1	5,05	10750	8338	416	536,9	22,9	39,6
I - В 2	5,04	10720	8518	427	537,6	21,6	38,5
I - В 3	5,0	10519	8242	420	536	21,8	39,5
II - 1 (Т)	4,96	11773	8260	428	610	24,5	52,82
II - 2 (δ)	5,0	11564	8330	425	590	25,0	52,2
II - 3	5,0	11760	8369	427	600	24,8	52,8

Таблиця 2 - Статична тріщиностійкість сталі 17Г2С у нафті

№ п/п	l, мм	P ₀ , Н	K ₀ , МПа√м
I - Н1	11,7	33000	43,98
I - Н2	11,8	33800	44,5
I - Н3	11,6	32900	43,7
II - В1	11,5	32300	42,9
II - В2	11,8	33700	44,2
II - В3	11,4	32800	43,8
II - 1	11,8	39600	55,2
II - 2	11,9	39700	54,8
II - 3	12,0	39800	56,1

Таблиця 3 - Характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 17Г2С

№ зразка	K _{th}	K _{fc}	K ₁₋₂	K ₂₋₃	K _*
МПа√М					
(○) I - Н1	6,209	86,0	12,5	51,0	31,9 (32,5)
() I - В1	6,225	88,0	12,8	60,0	32 (38,6)
(●) II - 1	6,965	92,0	13,4	18,0	36,2 (41,5)

Обговорення результатів досліджень. Оцінку зміни механічних характеристик матеріалу для інженерної практики проводять на основі традиційних методів із введенням додаткових коефіцієнтів запасу і врахуванням специфіки роботи труби. Для матеріалу труби згідно з нормативними документами допустиме розрахункове напруження [σ]₁, тоді величина допустимого напруження в трубі рівна після тривалої експлуатації [σ]₂ з урахуванням деградації

$$[\sigma]_2 = \frac{[\sigma]_1}{k}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт зниження руйнівних напружень, що враховує вплив експлуатаційних факторів.

У нашому випадку аналіз результатів досліджень, проведених на циліндричних зразках, свідчить, що величина максимальних напружень розриву знизилась в 1,15 рази. Це означає, що коефіцієнт запасу знизився на 12,3%, і матеріал труби може зруйнуватись на менших напруженнях, що були закладені в процесі проектування трубопроводу. Величина напружень течіння в експлуатованому і вихідному матеріалі залишилась незмінною. Це вказує на те, що пружні властивості матеріалу в цій області не змінилися. Зміна величини відносного звуження ψ на 27% відносного видовження δ на 13,6% вказує на зни-

ження пластичних властивостей і вичерпування запасу міцності і пластичності матеріалу.

Оцінка показників тріщиностійкості (опору росту тріщин) має важливе значення для додаткової, більш повної характеристики змін властивостей матеріалу. Показники тріщиностійкості не включаються в норми під час проектування і виготовлення труб. Однак необхідно відзначити, що характеристики тріщиностійкості визначають схильність матеріалу до виникнення найбільш небезпечних крихких руйнувань, а також інтенсивність розвитку в них найбільш поширених пошкоджень - втомних тріщин, що в багатьох випадках призводять до руйнування. Характеристики тріщиностійкості більш чутливі до характерної для металургійного виробництва температурної і агресивної дії середовища, ніж межа міцності матеріалу. Така тенденція спостерігається і під час врахування часу експлуатації. Процеси старіння і деградації більшою мірою проявляються в зміні характеристик статичної і циклічної тріщиностійкості. Характеристики статичної тріщиностійкості (K₀ - розрахункове значення коефіцієнта інтенсивності напружень; K_c - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень) визначають умови досягнення граничного стану і переходу тріщини в нестабільний стан, яка передусе остаточному руйнуванню

$$K_{max} = K_c. \quad (3)$$



Тут K_{\max} - максимальне значення розрахункових параметрів напружено-деформованого стану в зоні передруйнування, що визначаються із розв'язку відповідної задачі для матеріалу з тріщиною.

Зокрема, вираз для КІН можна представити в загальному вигляді

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F \quad (4)$$

за $P = \text{idem}$. Тут σ - напруження, що діють у зоні розміщення дефекту, a - параметр розміру тріщини; F - поправочна (тарувальна) функція, що залежить від геометрії конструктивного елемента і тріщини, а також розподілу напружень у послабленому перерізі.

Прямий розв'язок цієї задачі пов'язаний з багатьма труднощами: визначення розміру дефекту, його орієнтації, побудови тарувальної функції і ін.

Тому для оперативної оцінки стану металу і підвищення ризику виникнення крихкого руйнування, пов'язаного з експлуатаційними факторами доцільно використовувати метод порівняння існуючого і вихідного станів матеріалу.

В умовах геометричної подібності дефектів значення КІН пропорційне величині діючих напружень σ , а також пропорційне кореню квадратному із довжини тріщини a . Таким чином зі зменшенням статичної тріщиностійкості K_0 у n разів руйнівне напруження за тих же розмірів тріщини зменшиться в n разів, або критичні розміри тріщини зменшаться в n^2 рази за тих же значень навантаження.

Зокрема, дослідження статичної тріщиностійкості матеріалу експлуатованої труби в середовищі нафти і порівняння характеристик тріщиностійкості для вихідного матеріалу призводить до зменшення межі тріщиностійкості K_0 приблизно на 31,9%, а величини K_Q - на 31%. Це може викликати зменшення граничних навантажень на матеріал труби в 1,3 рази.

Циклічна тріщиностійкість матеріалу характеризується кінетичною діаграмою втомного руйнування, яка встановлює залежність швидкості росту втомної тріщини $V = dl/dN$ (середньої приросту довжини за один цикл навантаження) від коефіцієнта інтенсивності напружень за цикл K_{\max}

$$V = dl/dN = f(K). \quad (5)$$

Використовуючи цю залежність, можна визначити залишкову міцність матеріалу, тобто число циклів N_* , необхідне для зростання тріщини від початкового розміру a_0 до критичного a_c .

Результати такого розрахунку представляють для практики велику цінність, оскільки пряму пов'язують залишковий ресурс з параметрами дефектності матеріалу. Враховуючи труднощі коректного визначення діючих навантажень і розмірів вихідних дефектів, реалізувати цей розрахунок на практиці не вдається, оскільки неможливо точно врахувати складні експлуатаційні умови трубопроводу. Однак такий підхід може використовуватись для оцінки біжучого стану і планування необхідності і термінів проведення планового ремонту.

Важливою характеристикою кінетичної діаграми втомного руйнування є пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень K_{th}

Умова

$$K \leq K_{th} \quad (6)$$

оцінює розміри дефектів, що не розвиваються на заданому режимі циклічного навантаження.

Стосовно залежності (6) можна також використати розглянуті зиче оцінки для визначення зміни порогових умов розвитку тріщини внаслідок деградації металу під дією різних експлуатаційних факторів. Зокрема, зниження на 10,9% порогового коефіцієнта інтенсивності напружень під дією експлуатаційних факторів призводить до зниження порогової величини діючих напружень в 1,1 рази або зменшення розмірів безпечних тріщин в 1,2 рази.

Крім цього, порівняння кінетичних діаграм, побудованих для матеріалу експлуатованої труби (I-N1, I-B1) для низу і верху порівняно з вихідним матеріалом, дає достатню інформацію для зрівняння залишкового ресурсу. Зокрема, внаслідок довготривалого терміну експлуатації, водневої деградації, корозійного пошкодження збільшується швидкість росту втомної тріщини в 1,6 рази, знижується загальний залишковий ресурс в 1,6 рази.

Висновки

Встановлено, що після тривалої експлуатації (28 років) пластичні властивості сталі 17Г2С знизилась на 27%, а короткочасна міцність - на 13% порівняно із вихідним матеріалом. Межа текучості для експлуатованого і вихідного матеріалів практично не змінилась.

Характеристика статичної тріщиностійкості K_Q для сталі 17Г2С після тривалої експлуатації знизилась на 31%.

Характеристика циклічної тріщиностійкості сталі 17Г2С K_{th} зменшилась на 10,9%. Швидкість поширення втомної тріщини в матеріалі після тривалої експлуатації збільшилась в 1,6 рази.

Література

1. Иванцов О.М., Харитонов В. И. Надёжность магистральных трубопроводов. - М.: Недра, 1978. - С. 235.
2. Анучкин М. П., Горницкий В. Н., Мирошниченко Б. М. Трубы для магистральных трубопроводов. - М.: Недра, 1986. - С. 231.
3. ГОСТ 1437-73. Металлы. Методы испытания на растяжение. - М: Изд-во стандартов. 1972. - 21 с.
4. ГОСТ 25.506-85. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости (трещиностойкости) разрушения при статическом нагружении. - М: Изд-во стандартов. 1985. - 62 с.
5. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении: Методические указания. - М, 1993. - 53 с.

