

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ НА КОРОЗІЙНО-ВТОМНЕ РУЙНУВАННЯ СТАЛЕЙ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

Ю.Д. Петрина, Д.Ю. Петрина, О.Л. Козак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024,
e-mail: mtf@nuing.edu.ua

Оцінювання експлуатаційної надійності нафтогазопроводів є особливо актуальним завданням для України, оскільки більшість з них відпрацювали великі терміни. Непрогнозоване руйнування таких конструкцій призводить до значних економічних втрат і тяжких економічних наслідків. Для відвернення непередбаченого руйнування важливе значення має коректність методів прогнозування циклічної тріщиностійкості трубопроводів. Тому слід врахувати, що магістральні нафтогазопроводи експлуатуються при різних видах напруженого стану, на них діють змінні навантаження різних режимів, інтенсивності, частоти й асиметрії циклу тощо. Дослідження впливу таких умов експлуатації на характеристики опору втомного руйнування стають необхідними й актуальними для визначення залишкового ресурсу об'єктів тривалої експлуатації. Тому в даній роботі вивчено вплив асиметрії та частоти циклу, форми циклу навантаження, температури та товщини зразків на закономірності втомного руйнування сталей 17ГІС та 10ГС, з яких, в основному, виготовляють труби для газопроводів.

Досліджено спільний вплив попереднього пластичного деформування (ППД) і наводнювання на тріщиностійкість за статичних і циклічних навантажень трубопроводної сталі 17ГІС. За відсутності наводнювання у випадку ППД сталі спостерігається незначне зниження її короткочасної тріщиностійкості і підвищення опору росту втомної тріщини у припороговій ділянці. Наводнення матеріалу різко зменшує короткочасну тріщиностійкість сталі та інтенсифікує ріст втомних тріщин в середньоамплітудній ділянці низькочастотного навантаження. В результаті сумісної дії ППД і наводнення максимально знижується статична та циклічна тріщиностійкість сталі. З урахуванням цих чинників міцність трубопроводів за наявності в них тріщиноподібних дефектів може зменшитись у декілька разів, а довговічність на стадії стабільного підростання втомної тріщини – на порядок.

Ключові слова: асиметрія циклу, частота втомного навантаження, форма циклу навантаження, наводнювання, попередня пластична деформація, втомна тріщина, статична і циклічна тріщиностійкість.

Оценка эксплуатационной надежности нефтегазопроводов - сверхактуальное задание для Украины, поскольку большинство из них отработали большие сроки. Непрогнозируемые разрушения таких конструкций приводит к значительным экономическим потерям и тяжелым экономическим последствиям. Для предотвращения непредвиденного разрушения важное значение имеет корректность методов прогнозирования циклической трещиностойкости трубопроводов. Поэтому следует учесть, что магистральные нефтегазопроводы эксплуатируются при разных видах напряженного состояния, на них действуют переменные нагрузки разных режимов, интенсивности, частоты и асимметрии цикла и тому подобное. Исследования влияния таких условий эксплуатации на характеристики сопротивления усталостного разрушения необходимы и актуальны при определении остаточного ресурса объектов длительной эксплуатации. Поэтому в данной работе изучено влияние асимметрии и частоты цикла, формы цикла нагрузки, температуры и толщины образцов на закономерности усталостного разрушения сталей 17ГІС и 10ГС, из которых, в основном, изготавливают трубы для газопроводов.

Исследовано общее влияние предварительного пластического деформирования (ППД) и наводораживания на трещиностойкость при статических и циклических нагрузках трубной стали 17ГІС. При отсутствии наводораживания, ППД стали незначительно снижает ее кратковременную трещиностойкость и повышает сопротивление роста усталостной трещины в припороговом участке. Наводораживание материала резко уменьшает кратковременную трещиностойкость стали и интенсифицирует рост усталостных трещин на среднеамплитудном участке при низкочастотной нагрузке. В результате совместного действия ППД и наводораживания максимально снижается статическая и циклическая трещиностойкость стали. С учетом этих факторов прочность трубопроводов, в случае присутствия в них трещиноподобных дефектов, может уменьшиться в несколько раз, а долговечность на стадии стабильного подрастания усталостной трещины - на порядок.

Ключевые слова: асимметрия цикла, частота усталостной нагрузки, форма цикла нагрузки, наводораживание, предварительная пластическая деформация, усталостная трещина, статическая и циклическая трещиностойкость.

Evaluation of oil and gas pipelines operational reliability is especially actual for Ukraine as the majority of them was fulfilled by the big terms. Not predicted destructions of such designs leads to considerable economic losses and heavy economic consequences. For derivation of unforeseen destruction the great value has a correctness of metals of forecasting cyclic crack growth resistant pipelines. Therefore it is necessary to consider, that the main oil and gas pipelines are maintained at different kinds of intense pressure, upon them variable loadings of different modes, intensity, frequency and asymmetry of a cycle and so forth operate. Research of influence of such conditions of operation on characteristics of resistance of a fatigue residual resource of objects of long operation. Therefore in the given work influence as asymmetries and frequencies of a cycle, the form of a cycle of loading, temperature and thickness of samples on fatigue failure of a steels 17ГІС and 10 ГС from which, basically, produce of gas pipelines pipes is studied.

The general influence of the previous plastic deformation (PPD) and flooding on crack growth resistant at static and cyclic loadings of a pipeline steel 17Г1С is investigated. In the absence of flooding, previous plastic deformation of metal not considerably reduces its premature crack growth resistant and raises resistance of growth of a fatigue crack in nрunopозовом a site. Material flooding sharply reduces short-term crack growth resistant steels and intensifies growth of fatigue cracks in middle a site of low-frequency loading. The maximum fall static and cyclic crack growth resistant steels test as a result of strong influence PPD and flooding. Taking into account this factor of firmness of pipelines if to admit in them creak defects, the durability can decrease for stages stable growth a fatigue crack - ten times.

Keywords: asymmetry of a cycle, frequency of fatigue loading, the form of a cycle of loading, flooding, the previous plastic deformation, a fatigue crack, static and cyclic crack growth resistant.

Проблема оцінки надійності магістральних нафтогазопроводів (МНГП) загострилась останнім часом у зв'язку з тривалою експлуатацією основних її мереж [1]. Втрата МНГП працездатності зумовлена, в основному, кородуванням зовнішньої поверхні через порушення її проти-корозійного захисту [1, 2], або внутрішньої поверхні, що пов'язано з транспортуванням високоагресивних середовищ нафто- [3, 4] і газопроводами [5, 6]. Специфіка роботи цих тривало експлуатованих об'єктів зумовлена сумісною дією експлуатаційних напружень і корозійного середовища (грунтової води, підтоварної води чи газового конденсату для нафто- і газопроводів відповідно). Останніми дослідженнями встановлено, що руйнування трубопроводів в процесі експлуатації пов'язано з циклічними навантаженнями металу труби [7-10]. Воно дуже чутливе до концентраторів напружень, тому сприяє утворенню мікротріщин біля корозійних виразок, які в подальшому переростають в макротріщину, що поширюється в тіло труби.

Однак характер росту тріщини залежить від багатьох експлуатаційних чинників [11]. Так, асиметрія циклу і частота навантаження – одні з основних показників умов експлуатації трубопроводів, що впливають на кінетику субкритичного росту втомних тріщин в конструкційних матеріалах. Такий вплив мають також різні форми циклів навантаження, температура випробування, робоче середовище. В свою чергу, характер та інтенсивність впливу середовища визначаються як системою "матеріал-середовище", так і умовами циклічного навантаження – величиною коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), асиметрією, частотою і формою цикле навантаження, температурою випробувань тощо.

Перелічені вище проблеми на теперішній час вивчені ще недостатньо. Деякі висновки зроблені тільки за вибірковими значеннями, наприклад, асиметрії циклу чи частоти навантаження. Спільний вплив середовища та температури випробувань на циклічну тріщиностійкість трубних сталей взагалі не вивчався.

Метою даної роботи є вивчення впливу експлуатаційних чинників на корозійно-втомне руйнування сталей магістральних нафтогазопроводів.

Дослідження проводили на вітчизняній сталі 17Г1С ($\sigma_b = 510$ МПа, $\sigma_{0,2} = 363$ МПа, $\delta = 20\%$) магістральних газопроводів і сталі типу 10ГС ($\sigma_b = 445$ МПа, $\sigma_{0,2} = 270$ МПа, $\delta = 22\%$) труб імпортного виробництва магістральних

нафтопроводів. Зразки вирізали із труб запасу. Корозійними середовищами слугували модельний розчин водного конденсату (МРВК), який за своїм складом відповідає конденсату всередині труби газопроводу та підтоварна вода. Останню готували збовтуванням рівних об'ємів води та нафти з Надвірнянського нафтопереробного заводу з наступним відстоюванням і відокремленням води.

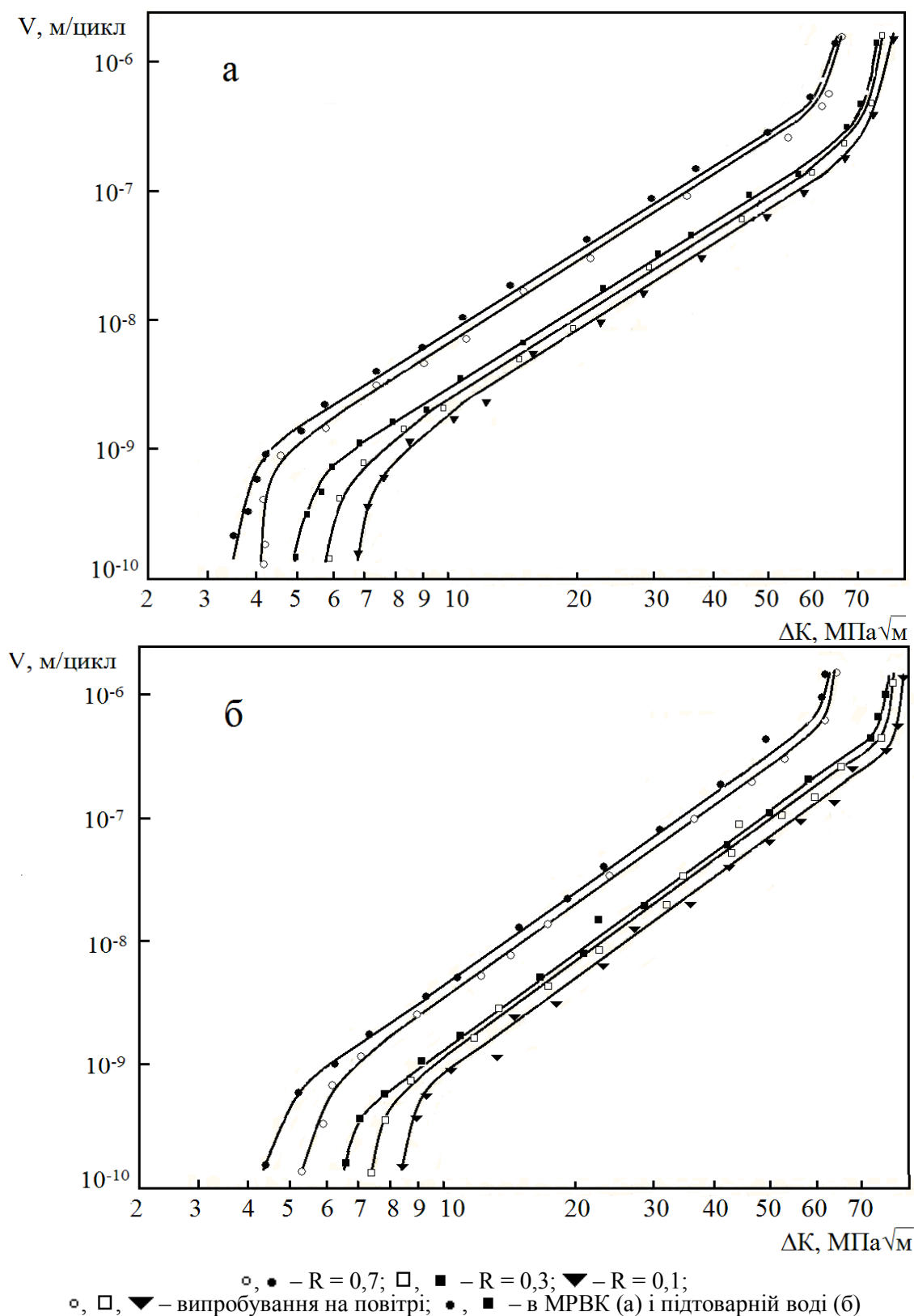
Для вивчення впливу асиметрії циклу на характер поширення втомних тріщин будували кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) за частоти навантаження $f = 0,3$ Гц.

Вплив середнього напруження в циклі на кінетику росту втомної тріщини має складний, деколи суперечливий, характер. Водночас існують певні універсальні тенденції.

З рис. 1 видно, що збільшення позитивної асиметрії циклу в межах $R = 0,1 \dots 0,7$ значно підвищує швидкість росту втомної тріщини (ШРВТ) на припороговій і третій ділянках КДВР. З ростом R суттєво знижуються як порогові значення ΔK_{th} , так і критичні ΔK_{fc} . Виявлена також тенденція до стабілізації кінетики на другій ділянці КДВР. Ця ділянка, незалежно від асиметрії, описується єдиною лінією, що свідчить про постійність коефіцієнтів C і n рівняння Періса.

Під час ступеневого переходу випробувань від $R = 0,1$ до $0,3$ і $0,7$ зниження ΔK_{th} для сталі 17Г1С становили 14,7% і 31%, а для сталі 10ГС відповідно 12,5% і 28,2%. Можна припустити, що сталь 17Г1С більш чутлива до впливу асиметрії циклу на циклічну тріщиностійкість (ЦТ), ніж сталь 10ГС. Однак відзначимо, що ця різниця не є суттєвою.

Важливим чинником, що контролює вплив асиметрії циклу на ЦТ, є робоче середовище. Як і під час випробування на повітрі, зростання асиметрії циклу обумовлює зниження параметра ΔK_{th} в корозійному середовищі (рис. 1). Щодо характеристики ΔK_{fc} , то вона мало залежала від впливу робочого середовища. У випадку випробування за умов, коли $R = 0,3$, спад величини ΔK_{th} у середовищі для сталі 17Г1С становив 13,8%, а для сталі 10ГС – 15,4%. Зростання коефіцієнту асиметрії до 0,7 призвело до того, що ці спади становили відповідно 12,5% і 13,8%. З наведених даних видно, що сталь 10ГС більш чутлива до дії середовища. Однак з порівняння механічних характеристик сталей 17Г1С і 10ГС слід було чекати зворотнього ефекту, оскільки пластичніші сталі загалом менш чутливі до дії середовища. Очевидно, що в цьому випадку вирішальну роль відіграла агресивність робочо-



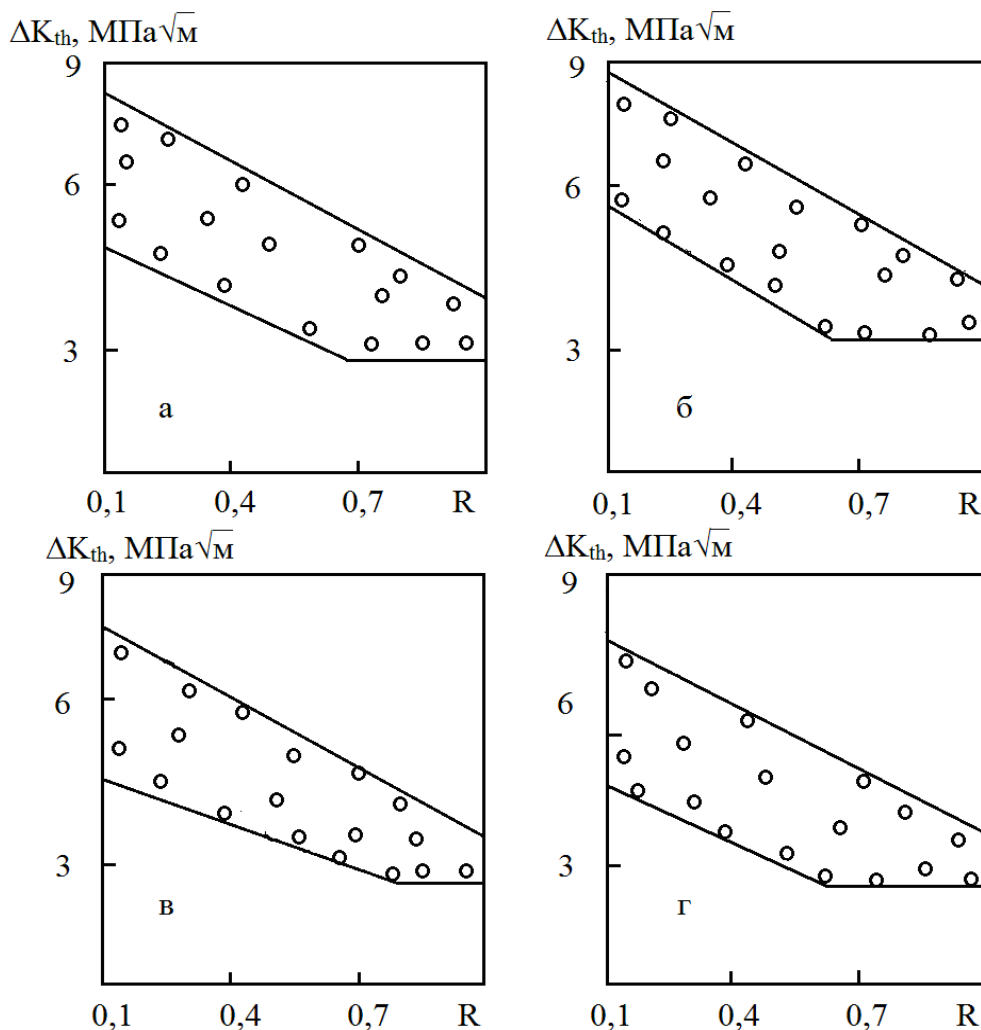
○, ● – R = 0,7; □, ■ – R = 0,3; ▼ – R = 0,1;
○, □, ▼ – випробування на повітрі; ●, ■ – в МРВК (а) і підтоварній воді (б)

Рисунок 1 – Вплив асиметрії циклу напружень на характер КДВР сталі 17Г1С (а) і 10ГС (б)

го середовища: вона була вищою для підтоварної води, ніж для МРВК.

Монотонне зниження ΔK_{th} у зв'язку з ростом асиметрії циклу спостерігається до певної величини параметра R, потім значення порогів втоми стабілізуються на найнижчому рівні.

Зменшення коефіцієнта асиметрії поряд з ростом ΔK_{th} збільшує зону розкиду експериментальних даних (рис. 2). З рис. 2 видно, що стабілізація порогів втоми відбувається за $R \approx 0,7$ для сталі 17Г1С і $R \approx 0,6$ для сталі 10ГС.



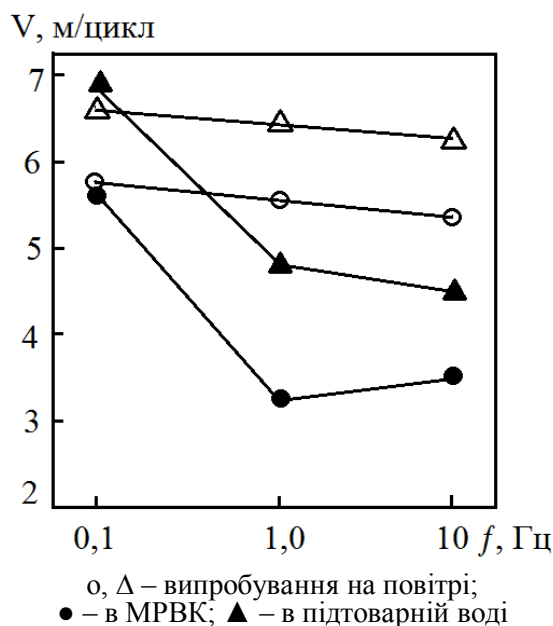
а, в – сталь 17Г1С; б, г – сталь 10ГС;
а, б – випробування на повітрі; в – у МКВР; г – у підтоварній воді

Рисунок 2 – Залежності порогових значень ΔK_{th} від асиметрії циклу

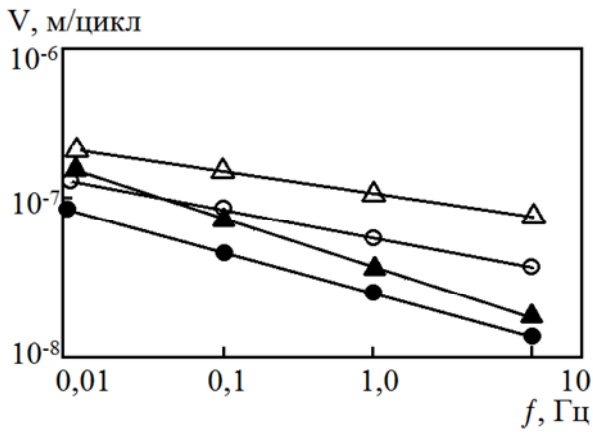
Одним з основних чинників, які характеризують умови експлуатації МНГП, є частота циклічного навантаження. Найбільше частота випробувань впливає на ЦТ сталей на припороговій ділянці КДВР. На повітрі частота навантаження здебільшого не впливає на кінетику руйнування сталей, проте корозійні середовища суттєво її змінюють. Частотна залежність порогових КІН в корозійному середовищі має немонотонний характер з мінімумом порогового розмаху ΔK_{thc} за частоти 1 Гц (рис. 3). При цьому значення ΔK_{thc} на ділянці низькочастотного навантаження за $f = 0,1$ Гц перевищує таке, що отримали у випадку $f = 10$ Гц.

У випадку поширення втомної тріщини із швидкостями, що відповідають середньоамплітудній ділянці КДВР, частотні ефекти виражені значно слабше. Збільшення частоти навантаження дещо знижує ШРВТ (рис. 4).

Випробування трубних сталей 17Г1С і 10ГС на повітрі показали, що підвищення на два порядки частоти навантажень знижує ШРВТ на другій ділянці КДВР в 2-3 рази, що не перевищує розміру смуги розкиду, характерного для втомних випробувань.



о, Δ – випробування на повітрі;
● – в МРВК; \blacktriangle – в підтоварній воді
Рисунок 3 – Вплив частоти навантаження на рівень припорогових КІН сталей 17Г1С (о, ●) і 10ГС (Δ , \blacktriangle)



○, △ – випробування на повітрі;
● – в МРВК; ▲ – в підтоварній воді

Рисунок 4 – Вплив частоти навантаження на ШРВТ в сталях 17Г1С (○, ●) і 10Г1С (△, ▲)

За випробувань у робочих середовищах ШРВТ трубних сталей більш чутлива до зміни частоти навантаження. Це впливає із зростання кута нахилу залежності $V = f(f)$. Співвідношення між даними параметрами можна визначити й аналітичним шляхом за формулою

$$d\ell/dN = k \cdot f + A,$$

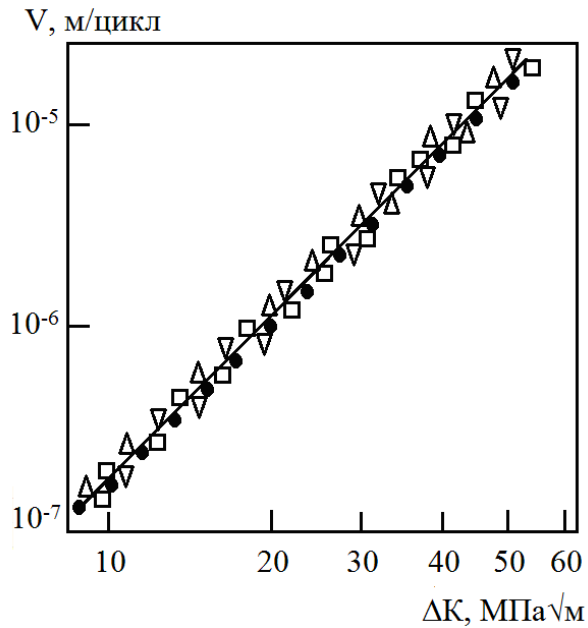
де k і A – постійні для системи „матеріал – середовище”, які визначаються експериментально.

Залежність ШРВТ від частоти навантаження на третій ділянці КДВР не визначали через методичні труднощі проведення експерименту. За один цикл відбувається значний приріст тріщини, що не дозволяє провести випробування в широкому діапазоні частот навантаження.

Вивчали вплив форм циклів навантаження на ЦТ трубної сталі 17Г1С. Дослідження, проведені в припороговій ділянці, не виявили ніяких змін величин ΔK_{th} за різних форм циклів навантаження. Такі ж випробування, проведені в середньоамплітудній ділянці КДВР за частоти навантаження 0,3 Гц, також показали, що ШРВТ не залежить від форми циклу навантажень (рис. 5).

Наші висновки узгоджуються з даними роботи [12], в якій вказано, що вплив форми циклу навантаження на кінетику росту втомної тріщини можливий за температур вище 820 К і пов'язаний взаємозв'язками форми циклу з процесами повзучості під час циклічного навантаження.

Вплив температури випробувань на ЦТ металів визначається дією температурного чинника на пластичну деформацію у вершині тріщини. Адже підвищення температури випробувань полегшує пластичну деформацію, що впливає на ріст втомної тріщини. Температурні залежності росту втомної тріщини мають певні особливості за низьких і підвищених температур. Неврахування цього призвело до того, що перші дані про температурні зміни ШРВТ були суперечливі [13-16]. В наступних дослідженнях показано [17], що такі неоднозначні трактування



○ – синусоїдальний; □ – прямокутний; △ – трикутний;
▽ – пилчастий; ● – імпульсний

Рисунок 5 – КДВР сталі 17Г1С при навантаженні з $f = 0,3$ Гц з різною формою циклу навантажень

результатів експериментів пов'язані з неврахуванням впливу на ШРВТ структури матеріалу, амплітуди навантаження тощо, а загальні висновки робились часто на основі випробувань у певному невеликому діапазоні температур.

Враховуючи вищесказане, звертаємо увагу на те, що наші випробування були проведені в діапазоні температур 233...353 К, який відповідає експлуатаційним умовам МНГП.

Характер впливу температури випробувань на кінетику росту втомної тріщини сталі 17Г1С наглядно ілюструється залежністю ШРВТ від температури за різних фіксованих значень розмаху КІН (рис. 6).

З підвищенням температури випробувань ШРВТ монотонно зростає. З рис. 6 видно, що ШРВТ за температури 233 К залишається завжди меншою, ніж за температури 353 К в межах одного КІН. Ця різниця в швидкості з ростом рівня розмаху КІН весь час зменшується і за високих ШРВТ ($V \geq 10^{-6}$ м/цикл) практично зникає (рис. 7).

З рис. 6 видно, що випробування у середовищі МРВК з підвищенням температури інтенсифікує зростання ШРВТ сталі 17Г1С. Це пов'язано, на наш погляд, з посиленням дифузійних процесів у високонапруженій зоні вершини тріщини за підвищених температур.

Згідно основних положень механіки руйнування [18] товщина зразків визначає напружено-деформований стан матеріалу у вершині тріщини. Оскільки в МНГП використовуються труби різної товщини, то важливим є питання про її вплив на ЦТ металу труби.

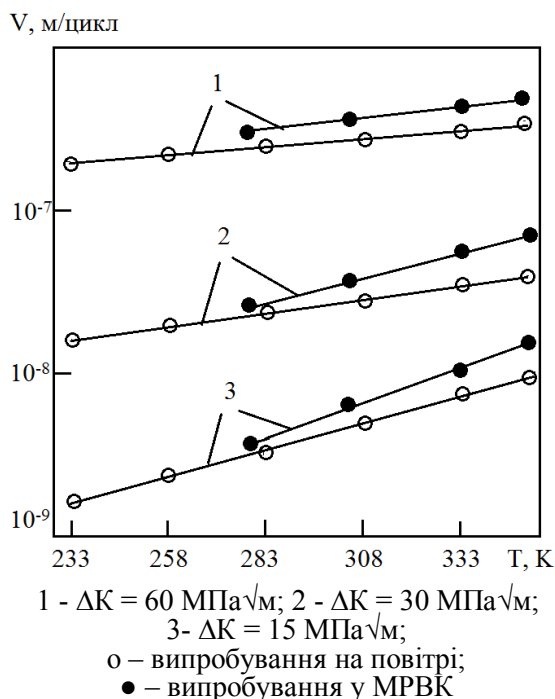


Рисунок 6 – Температурні залежності ШРВТ в сталі 17Г1С за фіксованих рівнів розмаху КІН

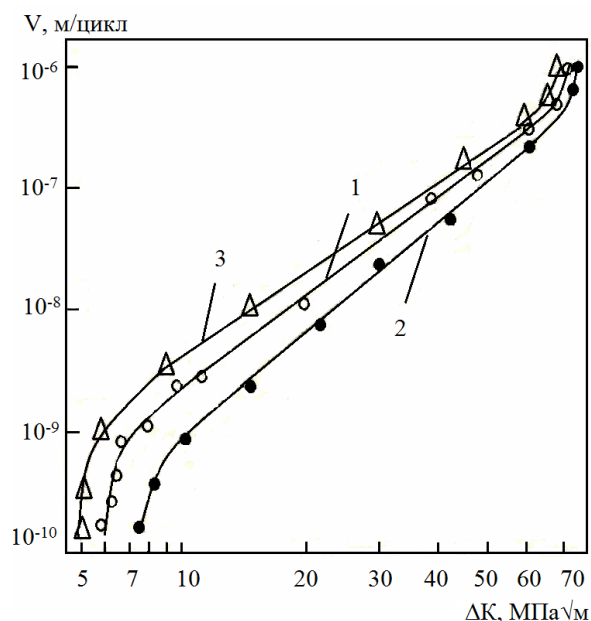
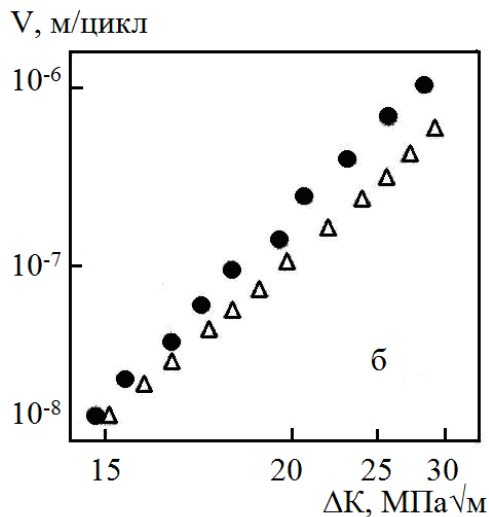
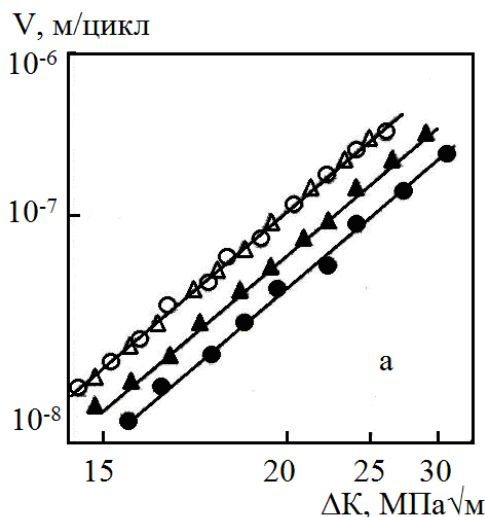


Рисунок 7 – КДВР сталі 17Г1С за температур 293 К (1), 233 К (2) і 353 К (3)



Товщина зразків: ● – 2 мм; ▲ – 5 мм; o – 12 мм; Δ - 14 мм

Рисунок 8 – Вплив товщини зразків на ШРВТ в сталі 17Г1С за навантаження чотириточковим згином (а) і розтягом зразків з одностороннім надрізом (б)

Дані щодо впливу товщини зразків на ріст втомних тріщин досить суперечливі. Автори [19, 20] вказують на підвищення ШРВТ із збільшенням товщини зразків, [21, 22] – зменшення ШРВТ, а [23] вважають ШРВТ незалежною від товщини зразків. Такі міркування, очевидно, обумовлені широким спектром досліджуваних товщин матеріалів і рівнів їх міцності. Важливу роль тут відіграють також відмінності в умовах випробувань зразків.

Вивчали вплив товщини зразків на ріст втомних тріщин в трубних сталях 17Г1С. Механічні випробування проводили за двома схемами: 1) чотириточковий згин зразків і 2) розтяг зразків з одностороннім надрізом.

На рис. 8а наведені результати досліджень, отримані за навантаження чотириточковим згином. Зразки товщиною 2 мм мали найнижчу ШРВТ. З ростом товщини зразків ШРВТ помітно підвищується. Однак цей ефект спостерігається до тих пір, поки товщина зразків не перевищуватиме 12 мм. Подальше збільшення товщини сталей майже не змінює ШРВТ.

У ході випробування зразків за другою схемою (розтяг зразків з одностороннім надрізом) результати досліджень є протилежними: в тонких зразках (товщиною 2 мм) ШРВТ була вищою, ніж в товстих (14 мм). До того ж відзначимо, що ШРВТ в товстих зразках (14 мм),

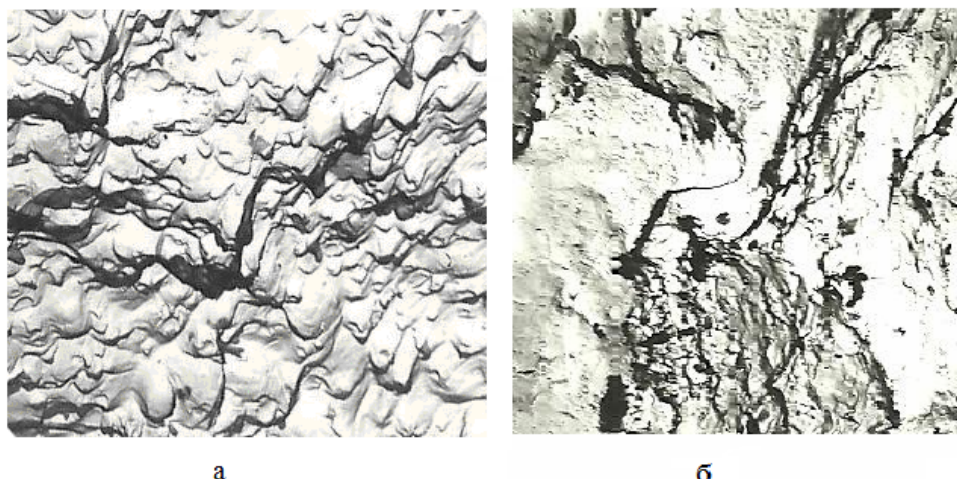


Рисунок 9 – Мікрофрактограми зламів зразків товщиною 14 мм із сталі 17Г1С, зруйнованих згином (а) і розтягом (б). $\times 3000$

навантажених розтягом, була вищою, ніж в зразках тієї ж товщини, навантажених згином.

Макробудови зламів зразків, навантажених згином і розтягом, суттєво відрізнялися. У випадку навантаження згином, незалежно від товщини зразків, ріст втомних тріщин відбувається з утворенням прямого зламу, а за другою схемою навантаження утворюється косий злам. Шляхом мікрофрактографічного аналізу встановлено, що в обох випадках навантаження на плоских ділянках зламів переважає борознистий мікрорельєф (рис. 9).

Підвищення ШРВТ інтенсифікує розвиток в'язкого ямкового механізму, властивого росту втомної тріщини за статичного навантаження. Збільшення площі областей ямкового руйнування у втомному зламі відображає перехід від плоскодеформованого до плосконапруженого стану матеріалу у вершині тріщини. Для зразків, навантажених згином (незалежно від їх товщини), кут нахилу експериментальних залежностей на КДВР, який визначає величину показника n в рівнянні Періса, практично постійний. З цього випливає: якщо тріщина росте з утворенням втомних борізодок, зміна напружено-деформованого стану біля її вершини у випадку зміни товщини зразків не впливає на опір втомному руйнуванню. В процесі формування косоного зламу (тобто в зразках товщиною 2 мм, які пройшли випробування розтягом) ріст втомних тріщин відбувається за двома механізмами: зсувом і відривом. Останнє підтверджується наявністю сформованих плоских ділянок ямкового руйнування. Отже, в зламі наявні ознаки плосконапруженого стану матеріалу. Це відображається в ШРВТ (рис. 8, 9 б).

Тож існує як мінімум три чинники, що здатні вплинути на ШРВТ шляхом зміни геометрії зразків: напружено-деформований стан матеріалу у вершині тріщини, його мікроструктура та умови навантаження зразків.

Окрім товщини зразків досліджено вплив на швидкість росту тріщини їх ширини. Збільшення ширини зразків від 60 мм до 150 мм за їх товщини 10 мм практично не вплинуло на швидкість росту тріщин.

Вивчали вплив МРВК на ШРВТ в зразках різної товщини. Випробування проводили за постійного значення розмаху $\Delta K = 30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. З даних, наведених на рис. 10, видно, що наявність робочого середовища пришвидшує ріст втомних тріщин за навантаження чотири точковим згином в зразках різної товщини. При цьому зі спадом товщини зразків цей вплив зменшується.

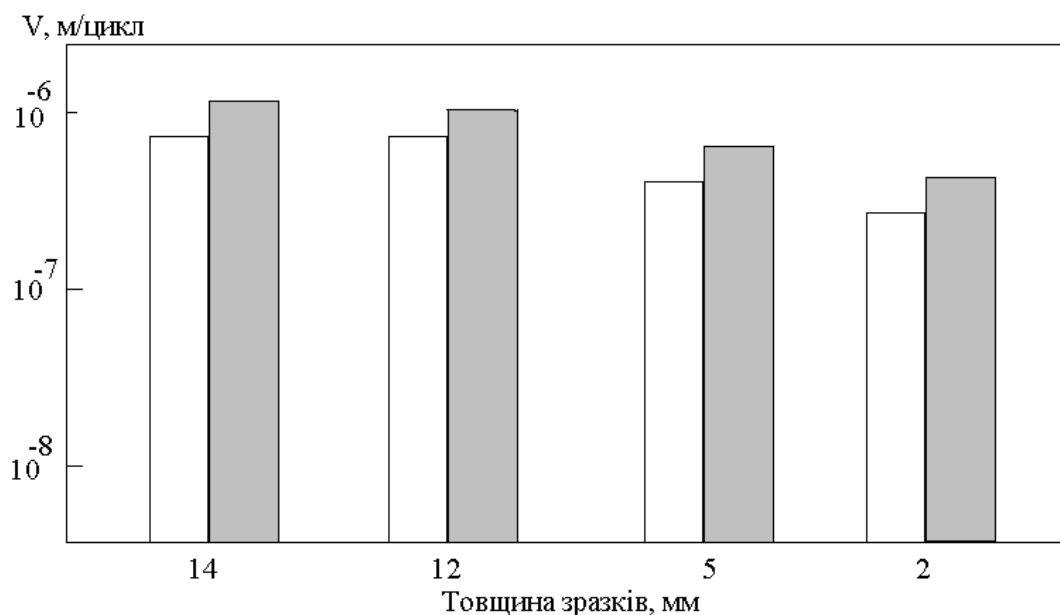
Найбільший приріст ШРВТ спостерігався для зразків товщиною 14 мм (на 15%). В той же час для зразків товщиною 12, 5 і 2 мм він становив відповідно 14%, 12% і 11%. Очевидно, що в товстіших зразках довжина лінії контакту середовища з напруженим металом у вершині тріщини більша порівняно з тоншими зразками. Це покращує умови абсорбції та посилює негативний вплив робочого середовища на сталь. Так, якщо на повітрі ШРВТ зразків товщиною 14 мм і 12 мм була однаковою (рис. 8 і 10), то під впливом МРВК для товстішого зразка вона стала трохи вищою.

Аналогічна тенденція спостерігалась за випробувань розтягом зразків з одностороннім надрізом (рис. 11).

Однак перехід до більш жорсткого виду випробувань інтенсифікує зростання ШРВТ під впливом МРВК. Так, для зразків товщиною 14 мм це зростання становило 20%, а при товщині 2 мм – 16%. Нагадаємо, що за чотириточкового згину відповідні значення становили 15% і 11%. Встановлено також, що зі зростанням значень ΔK чутливість до підвищення ШРВТ властива як найтоншим ($t = 2 \text{ мм}$), так і зразкам найбільшої товщини ($t = 14 \text{ мм}$), які підлягали дослідженням у МРВК (рис. 12).

Вищі значення параметру ΔK відповідали більшому приросту ШРВТ у МРВК. Однак цей приріст був незначний. Розмір смуг розкиду був невеликий і залишався характерним для втомних випробувань. Тому робити будь-які висновки з цього питання не варто.

Експлуатація МНГП може призводити до перевантажень, які сприяють утворенню залишкової пластичної деформації металу на окремих ділянках трубопроводу. Такі переванта-



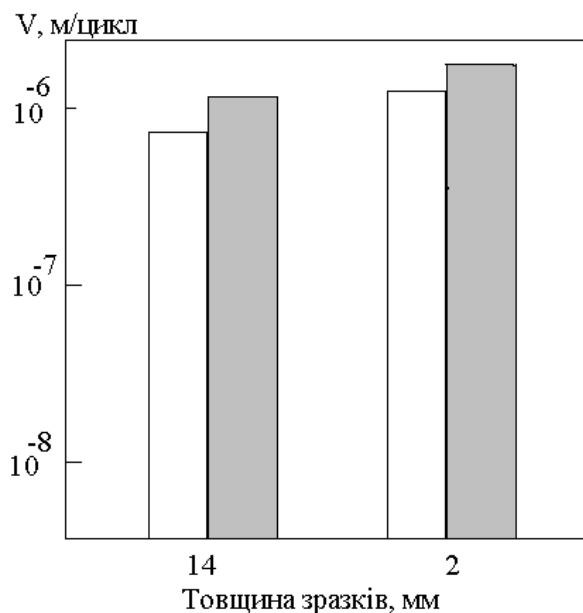
світлі символи – випробування на повітрі, темні – у МРВК

Рисунок 10 – Вплив товщини зразків і робочого середовища (МРВК) на ШВРТ в сталі 17Г1С за навантаження чотириточковим згином при $\Delta K = 30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$

ження виникають здебільшого у магістральних трубопроводах, які прокладені в гірських умовах, де часто відбуваються зсуви ґрунтів [24, 25]. Тому вивчали вплив залишкової пластичної деформації на статичну та циклічну тріщиностійкість матеріалу трубопроводу. Залишкову пластичну деформацію отримували попереднім пластичним деформуванням (ППД) зразків. Слід також враховувати, що робочі середовища сильно наводнюють метал труб [1, 4, 26], а спільна дія перевантаження і наводнювання мають один з найбільших впливів на окрихлення сталей.

Дослідження проводили на призматичних зразках розмірами 2x12x180 зі сталі 17Г1С. Мала товщина зразків забезпечувала максимально можливе наводнювання металу в умовах його катодної поляризації. Залишкова пластична деформація складала 5%. Посередині зразків наносили концентратор, глибина якого становила 1 мм, а радіус у вершині – 0,1 мм. Наводнювання виконували електролітичним способом катодної поляризації зразків. У випадку вивчення статичної тріщиностійкості на зразках попередньо наводили втомні тріщини, а потім впродовж трьох годин піддавали їх катодній поляризації у розчині NaOH з pH=12,5 за густини струму 0,01 А/м². Подальше зростання часу наводнювання не впливало на рівень тріщиностійкості матеріалу. Після цього зразки навантажували розтягом з записом діаграми «сила розтягу F – зміщення берегів тріщини Δ». Критичні значення КІН визначали згідно вимог [27].

Втомні випробування проводили навантаженням зразків згином за віднульового циклу із частотою в межах 0,3...10 Гц. Довжина тріщини фіксувалася по обидві сторони зразка пересувним мікроскопом МБС – 11. Методика проведення досліджень відповідала рекоменда-



світлі символи – випробування на повітрі, темні – у МРВК

Рисунок 11 – Вплив товщини зразків і робочого середовища (МРВК) на ШВРТ у сталі 17Г1С за навантаження розтягом зразків з одностороннім надрізом при $\Delta K = 30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$

ціям робіт [28, 29]. Під час випробувань на повітрі потрібно враховувати можливість десорбції водню. Тому зразки наводнювали впродовж трьох годин не тільки до початку, але й під час навантаження. Для цього зразок встановлювався в електрохімічну комірку. Електроліт і густина струму катодної поляризації були ті ж, що й під час випробування на статичну в'язкість руйнування.

Випробування на статичну тріщиностійкість показали, що діаграми навантаження роз-

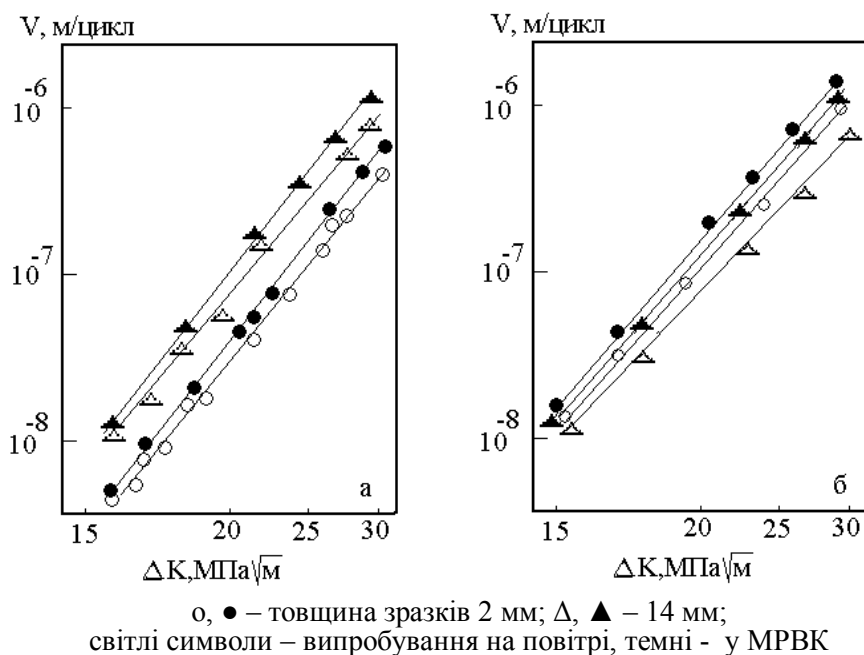


Рисунок 12 – Вплив товщини зразків, розмаху КІН, ΔK і робочого середовища (МРВК) на ШРВТ в сталі 17Г1С за навантаження чотириточковим згином (а) і розтягом зразків з одностороннім надрізом (б)

Таблиця 1 – Характеристики статичної тріщиностійкості сталі 17Г1С

$K_c (K_{Ic}), \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$			
Вихідний стан	Після наводнювання	Після ППД	Після наводнювання і ППД
120	58	108	34

тягом мали у верхній частині значне відхилення від прямолінійності. Це свідчить про значну пластичну деформацію у вершині тріщини, яка передувала її підростанню. Для зразків, які проходили ППД з наступним наводнюванням, лінійність діаграм зберігалася аж до їх руйнування.

В цьому єдиному випадку серед усіх досліджень на короточасну тріщиностійкість вдалось визначити значення K_{Ic} . Цей параметр разом з трьома іншими характеристиками K_c , отриманими за інших умов навантаження, наведені в таблиці 1.

Результати випробувань свідчать, що ППД знизилу в'язкість руйнування від 120 до 108 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Спад становить близько 10%. Наводнювання більш суттєво знизилу статичну тріщиностійкість сталі. Її значення (58 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) порівняно зі значеннями K_c сталі у вихідному стані (120 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) зменшилось більш як удвічі. Ще більше падіння показника K_c (від 108 до 34 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) відмічено в зразках, що пройшли ППД. Сумарний вплив наводнювання і ППД зменшують в'язкість руйнування трубної сталі в 3,5 рази.

ППД позитивно впливає на опір поширенню втомних тріщин (рис. 13). Зі зниженням ΔK зазначений ефект зростає. Так, порівняно з ΔK_{th} для вихідного матеріалу пороговий розмах КІН для ППД матеріалу зріс від 5,8 до 8,7 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (у 1,5 рази). З переходом до випробувань за високих значень ΔK вплив ППД повністю зникає.

З рис. 13 а видно, що наводнювання вихідного матеріалу має незначний вплив на кінетику втомного руйнування. Однак відзначимо деякий позитивний вплив наводнювання на швидкість росту тріщини в області припорогових швидкостей у випадку високої частоти навантаження (10 Гц). Із збільшенням ΔK і зниженням частоти навантаження на порядок (до 1 Гц) в другій зоні КДВР спостерігали зростання ШРВТ наводненої сталі (крива 3 на рис. 13а).

Матеріал після ППД виявив набагато вищу чутливість до наводнення (рис. 13б). За підвищених значень ΔK спостерігали сильну залежність характеру КДВР від частоти навантаження. Вищій частоті відповідає менша ШРВТ. Із зниженням частоти навантаження від 10 до 0,3 Гц за рівня $\Delta K=20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ШРВТ зросла на порядок. В середньоамплітудній ділянці КДВР зафіксовано різкий стрибок швидкості, який відображає, на наш погляд, схильність сталі до водневого окрихлення. Розмах ΔK , за якого відбувається стрімкий ріст швидкості, залежить від частоти навантаження. Мінімальне його значення (близько 12 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) відповідає найменшій частоті $f = 0,3 \text{ Гц}$ (крива 4 на рис. 13б).

Висновки

1. Збільшення позитивної асиметрії циклу в межах 0.1...0.7 значно підвищує ШРВТ на припороговій і третій ділянках КДВР. З ростом коефіцієнта асиметрії суттєво знижуються як

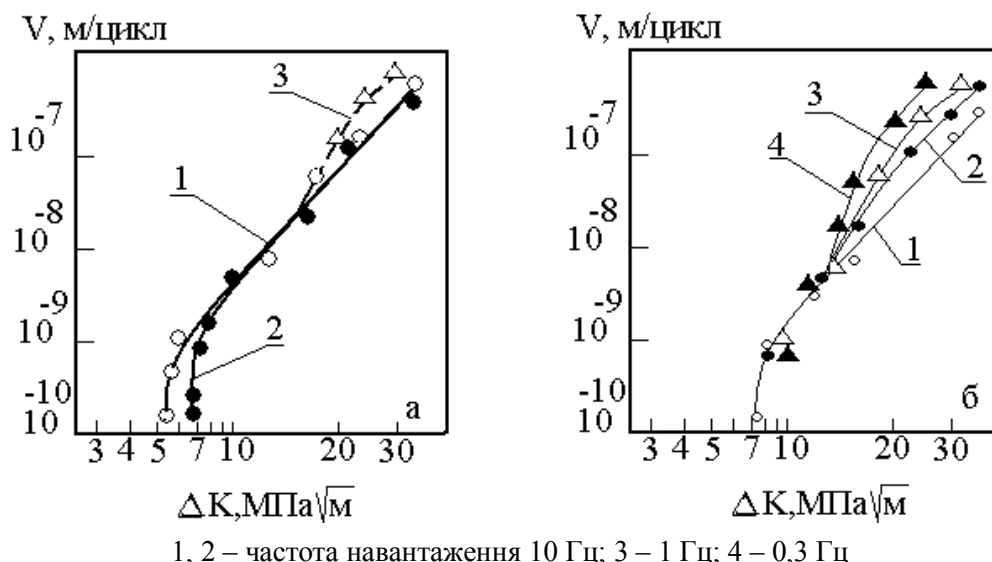


Рисунок 13 – Залежності V-ΔK для ненаводненої (1) і наводненої (2, 3, 4) сталі 17Г1С у вихідному стані (а) та після ППД (б)

порогові значення амплітуди КІН - ΔK_{th} , так і критичний КІН у випадку циклічного навантаження - ΔK_{fc} .

Виявлена тенденція до стабілізації кінетики на другій ділянці КДВР, яка незалежно від асиметрії описується єдиною лінією, що свідчить про постійність коефіцієнтів C і n рівняння Періса.

Зростання асиметрії циклу обумовлює зниження параметра ΔK_{th} в корозійному середовищі, в той час як ΔK_{fc} мало залежить від впливу середовища.

Монотонне зниження ΔK_{th} у зв'язку з ростом асиметрії циклу спостерігається до певної величини параметра R , потім значення ΔK_{th} стабілізується на найнижчому рівні.

2. На повітрі частота навантаження практично не впливає на кінетику руйнування трубних сталей. Частотна залежність порогових КІН в корозійному середовищі має монотонний характер з мінімумом порогового розмаху ΔK_{th} за частоти 1 Гц.

В середньоамплітудній ділянці КДВР збільшення частоти навантаження дещо знижує ШРВТ. За випробувань у корозійно-активному середовищі ШРВТ трубних сталей більш чутлива до зміни частоти навантаження.

Запропонована аналітична залежність для визначення ШРВТ залежно від частоти навантаження.

3. Дослідження, проведені в припороговій та середньо амплітудній ділянках КДВР, показали, що ШРВТ не залежить від форми циклу навантаження.

4. З підвищенням температури випробувань ШРВТ монотонно зростає. З ростом рівня розмаху КІН різниця між цими швидкостями постійно зменшується і за високих ШРВТ ($V > 10^{-6}$ м/цикл) практично зникає. Підвищення температури за випробувань у середовищі інтенсифікує зростання ШРВТ. Це пов'язано з інтенсифікацією дифузійних процесів у високо-

напруженій зоні вершини тріщини за підвищених температур.

5. Встановлено як мінімум чотири чинники, здатні вплинути на ШРВТ шляхом зміни товщини зразків: напружено деформований стан матеріалу у вершині тріщини, його мікроструктура, вид механічного навантаження зразків і корозійно-активне середовище.

6. За відсутності наводнювання ППД сталі 17Г1С незначно знижує її короточасну тріщиностійкість і підвищує опір росту втомної тріщини у пороговій ділянці. Наводнення металу різко зменшує короточасну тріщиностійкість сталі та інтенсифікує ріст втомних тріщин в середньоамплітудній ділянці низькочастотного навантаження. Максимального пониження статична та циклічна тріщиностійкість сталі знають в результаті спільного впливу ППД і наводнювання.

Література

- 1 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та їх запобігання: науково-технічний посібник: у 3-х т.: Основи оцінювання деградації трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2011. – 445 с.
- 2 Гончарук М.І. Корозія і розгерметизація газопроводів // Нафтогазова промисловість. – 2003. – №2. – С. 56-57.
- 3 Слободян З.В. Корозійна тривкість трубної сталі у нафто-водних середовищах / Слободян З.В., Г.М. Никифорчин, О.І Петрушак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – №3. – С. 93-96.
- 4 Експлуатаційне окрихчення сталі магістрального нафтопроводу / О.Т. Цирульник, Г.М. Никифорчин, О.І. Звірко, Д.Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – №2. – С. 125-126.

- 5 Detecting Internal Corrosion of Natural Gas Transmission Pipelines : Field Tests of Probes and Systems for Real-time Corrosion Measurement / B.S. Covino, Jr.S.J. Bullard, S.D. Cramer // Proc. of 16th Intern. Corrosion Conference, Beijing, China, Sept. 19-24, 2005. – P. 4-17.
- 6 Корозія внутрішньої поверхні магістральних газопроводів / С. Поляков, Л.Ниркова, А. Клименко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – спец. випуск № 5. – Т.1. – С. 300-304.
- 7 Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, К.М. Ямалеев, Г.В. Журавлев, Ф.И. Бадинов. – М.: ООО «Недра – Бизнес центр», 2001. – 231 с.
- 8 Прогнозування залишкового ресурсу магістральних трубопроводів: проблеми і перспективи / В.М. Івасів, В.І. Артїм, Р.О. Дейнега та ін. // Розвідка та розробка нафтогазових і газових родовищ. – 2007. – №3. – С. 102-108.
- 9 Красовский А.Я. Трещиностойкость стальной магистральных трубопроводов / А.Я. Красовский, В.Н. Красико. – К.: Наукова думка, 1990. – 176 с.
- 10 Особенности разрушения материалов нефтегазопроводов / А.Г. Гареев, М.А. Худяков, И.Г. Абдулин; под ред. А.Г. Гареева и И.Г. Абдулина. – Уфа: Гилем, 2006. – 156 с.
- 11 Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втомі і тріщино тривкість / П.В. Ясній. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
- 12 Plumtree A. Waweform and frequency effects on the hightemperature fatigue crack propagation rate of stainless steel / A. Plumtree, S. Schäfter // Adv. Fracture Proc. 6th Int. Conf. Fracture, New Delphi, India, 4-10 Dec. 1984.- Oxford (U.K.): Pergamon Press, 1984.- Vol.3.- p.2249-2254.
- 13 Clark W.G. Influence of temperature and section size on fatigue crack growth behavior in Ni-Mo-V alloysteel/ W.G. Clark, H.E. Trout// Eng. Fract.Mech.1970. –2, №2.p.107-123.
- 14 Тощенко В.Т. Исследование закономерностей усталостного и хрупкого разрушения стали 15Г2АФД_{пс} при низких температурах / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский // Проблемы прочности. – 1973. – №3. – С. 11-17.
- 15 Anotil A.A. Effect of tempering temperature of fatigue crack propagation in 4340 steel / A.A. Anotil, E.B. Kula//Effect of Environment and complex Load Hystory on Fatigue Life. Philadelphia (Pa): Pergamon press, 1970.- p. 297 – 317. – (ASTM) STP462.
- 16 Wei R.P. Influence of temperature on fatigue creak growth in mild annealed Ti – 6Al – 4FIlloy/ R.P. Wei, D.L. Ritter// J. Matter. – 1972.-7, -№2. – p. 240-250.
- 17 Развитие усталостного разрушения в листовой малоуглеродистой стали при комнатной и низкой температурах / С.Я. Ярема, А.Я. Красовский, О.П. Осташ, В.А. Степаненко // Проблемы прочности. – 1977. – № 3. – С.21-26.
- 18 Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
19. Barsom J.M/ Fatigue crack propagation in high yield strength steel/. Barsom J.M, E.J. Imhof, S.T. Rolfe// Eng. Fract. Mech. – 1971. – 2. – p.301-317.
- 20 Thielen P. N. Fatigue crack propagation in 4140 steel / P.N. Thielen, E.F. Morris // Met. Trans. – 1975. – A6, №11. – p. 2133-2141.
- 21 Jack A.R. Effects of thickness on fatigue crack initiation and growth in notched mild steel specimens / A.R Jack, A.T. Price // Acta met. – 1972. – 20, №7. - p. 857-856.
- 22 Ritchie R.O. Effects of thickness on fibrous fracture from a notch and fatigue crack propagation in low strength steel / R.O. Ritchie, R. E. Smith, H.F. Knott// Met.Sci. – 1975. -9. –p. 485-492.
- 23 Griffith J.R. The influence of thickness on fatigue crack propagation rates in a low alloy steel weld metal above and below general yield / J.R. Griffith, C.E. Richards /Mater. Sci. and Eng. – 1973. – p.305-310.
- 24 Перун Й.В. Магістральні трубопроводи в горних умовах / Й.В. Перун. – М.: Недра, 1987. – 175 с.
- 25 Шлапак Л.С. Исследование напряженно деформированного состояния сложных участков трубопроводов в условиях горных Карпат с целью повышения их эксплуатационной надежности / Л.С. Шлапак // Методы и средства технической диагностики. – 1992. – №2. – С. 166.-172.
- 26 Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних трубопроводів / О.Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, Д.Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – №5. – С.97-104.
- 27 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. – 62 с.
- 28 РД50-345-82. 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.
- 29 Yarema S. Ya. Test method for determination of crack extension resistance under cyclic loading. – Lviv: Karpenko Phisico-Mechanical Institute, 1994. – 79 p.

Стаття надійшла до редакційної колегії

29.05.12

Рекомендована до друку професором

Грудзом В.Я.