

Техніка і технології

УДК 539.4

ОЦІНКА ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА КРИТИЧНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ

¹Є.І.Крижанівський, ²В.П.Рудко, ¹О.О.Онищук, ¹Д.Ю.Петрина

¹ ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
тел. (03422) 42264, факс (03422) 42139, e-mail: rector@ifdtung.if.ua

² ДП "Прикарпаттрансгаз", 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Незалежності, 92,
тел. (03422) 23022, факс (03422) 559088

Трещиностойкость магистральных трубопроводов оценивают по критическим коэффициентам интенсивности напряжений. Из-за методических сложностей в определении K_{IC} последний предлагают часто оценивать по ударной вязкости.

Однако определение вязкости разрушения по результатам ударной вязкости для стали 17Г1С-У может в отдельных случаях приводить к существенным погрешностям. Электронно-фрактографический анализ установил, что такие погрешности возникают, когда при этих испытаниях распространение трещины осуществляется по разным механизмам – хрупким или вязким. Указано на удовлетворительную корреляцию результатов испытаний на K_{IC} и растяжение.

Згідно з СНІП 2.05.06-85 розрахунки магістральних трубопроводів проводять на основі класичних методів; можливі відхилення їх в несприятливий бік враховуються введенням різних коефіцієнтів перевантаження, запасу міцності тощо [1]. У 2000 році в Україні були введені будівельні норми ВБН В.2.3-00018201.04-2000 „Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами”, де оцінка залишкової міцності магістральних трубопроводів (це, насамперед, оцінка їх здатності чинити опір поширенню тріщин) здійснюється через критичні коефіцієнти інтенсивності напружень (K_{IC}) [2]. Необхідність розробки даних норм викликана такими обставинами:

відсутністю методичної та нормативної бази щодо експлуатації магістральних трубопроводів за наявності дефектів;

необхідністю визначення залишкового ресурсу обладнання та подовження термінів експлуатації магістральних трубопроводів;

впровадженням систем моніторингу та оперативного обліку технічного стану магістральних трубопроводів;

Crack resistance of trunk pipelines is estimated by critical stress intensity factors. Because of methodical complexity of K_{IC} determination it is suggested to estimate by impact strength.

However, the determination of fracture toughness by impact elasticity data for 17Г1С-У steel can sometimes result in essential errors. The electronic-fractiographic analysis has established such errors occur when at these testings crack propagation is carried out by different mechanisms – fragile or viscous. Satisfactory correlation between K_{IC} and tension testings results is pointed out.

необхідністю підвищення якості експлуатації та збільшення міжремонтного періоду.

Короткочасне поширення тріщин вивчали на нормалізованих зразках, виготовлених зі сталі 17Г1С-У. Вид термообробки відповідає стану матеріалу труби в експлуатації. Зразки вирізали з труби діаметром 1020 мм, товщина стінки – 12 мм, хімічний склад сталі відповідав ТУ 14-1-1950-77. Випробування проводили на прямокутних балочних зразках з попередньо наведеною односторонньою боковою втомною тріщиною при чистому згині за допомогою розривної машини ІМ-5А. Розміри поперечного перерізу зразка: ширина 6 мм, висота брутто 18 мм, висота нетто (на місці наведення тріщини) 9 мм.

Використовувались загальновідомі методи нанесення втомних тріщин, механічних випробувань на K_{IC} і його підрахунку [3, 4].

Дослідження проводились в широкому діапазоні температур випробувань: від 73 К до 373 К.

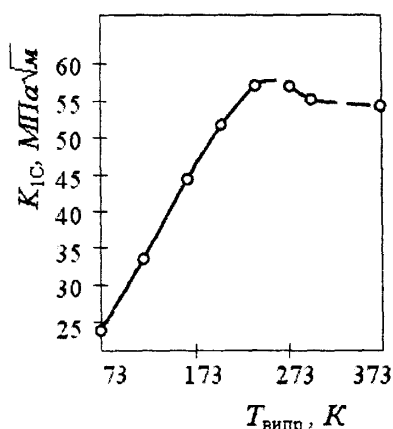


Рисунок 1 – Зміна характеристик в'язкості руйнування нормалізованої сталі 17Г1С-У залежно від температури випробувань

Як видно з рисунка 1, з підвищенням температури випробувань значення K_{1C} різко зростають. Однак при $T_{\text{випр.}} = 240 \text{ K}$ і вище в експерименті не виконуються умови плоскої деформації, тому оцінка K_{1C} стає недостовірною (пунктирні лінії на рисунку 1).

У зв'язку з цим слід відзначити, що правомірна оцінка тріщиностійкості трубних сталей за показниками критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень пов'язана із значними труднощами, оскільки для них зазвичай не виконуються обмеження, що накладаються лінійною механікою руйнування на величину пластичної деформації у вершині тріщини з врахуванням довжини останньої та розмірів досліджуваного зразка. Тому довідникова інформація про K_{1C} для трубних сталей досить обмежена. Враховуючи методичні труднощі при експериментальному визначенні в'язкості руйнування, будівельні норми дають змогу використовувати науково обгрунтовані кореляційні залежності K_{1C} і ударної в'язкості [2, с. 6]. Для цього розроблена спеціальна методика [2, додаток 2, с. 23-24]. Однак у ряді досліджень (наприклад, в роботах [5, 6]) вказується на окремі випадки різної структурної чутливості в'язкості руйнування і ударної в'язкості. Як наслідок, це може призводити до порушення кореляційних залежностей між K_{1C} і ударною в'язкістю.

Щоб з'ясувати дане питання, проведемо серіальні випробування на ударну в'язкість зразків Менаже зі сталі 17Г1С-У в прийнятному нами діапазоні температур випробувань — від 73К до 373К.

Принагідно зазначимо, що хоч схильність сталі до крихкого руйнування зазвичай пов'язують з поняттям холодноламкості, температура випробувань — це не єдиний фактор, який має вплив на характер руйнування. Останній значною мірою залежить від виду навантаження та структури сталі, яка визначається перш за все температурою відпуску та вмістом вуглецю, а також величиною зерна, його орієнтованістю і т.п. На теперішній час відомо чимало методик оцінки чутливості сталей до крихкого руйну-

вання, причому більшість з них базуються на побудові кривих холодноламкості різного типу зразків, в тому числі стандартних зразків Менаже, зразків з нанесеними втомними тріщинами і т.д. Суть цих методик полягає у фіксації крихко-в'язкого переходу (КВП), який оцінюється характером температурної залежності роботи руйнування. З точки зору ефективності використання тієї чи іншої методики важливе значення має характер одержуваної кривої холодноламкості, який визначається її крутизоною в інтервалі перехідних температур і висотою порогу холодноламкості (тобто різницею в роботі цілком в'язкого та крихкого руйнувань).

Розглянемо вплив різних видів термічної обробки на характер кривих холодноламкості сталі 17Г1С-У.

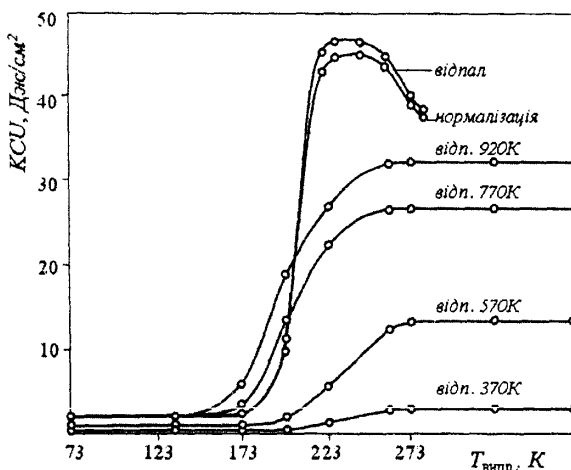


Рисунок 2 – Криві холодноламкості сталі 17Г1С-У після відпалу, нормалізації та гартування з подальшим відпуском при різних температурах

Згідно з рис. 2 підвищення температури відпуску призводить до збільшення крутизни кривих холодноламкості та зменшення перехідного інтервалу температур. Сприятлива роль високого відпуску (покращення) порівняно з відпалом і нормалізацією полягає, головним чином, у зсуві області повністю крихких руйнувань в бік більш низьких температур. Необхідно, проте, пам'ятати, що розглянутий вище характер впливу температури відпуску на хід кривих холодноламкості може бути дещо порушений в певних інтервалах температур, де виникає небезпека міжзеренного відпускового окрихчення.

Зміщення порогів холодноламкості при високих відпусках, відпалі та нормалізації порівняно з низьким відпуском проходять під впливом двох факторів, які мають різний вплив: збільшення пластичності матриці у високовідпущеному стані зсуває поріг холодноламкості в бік більш низьких температур, а виділення вторинної фази – цементиту — в бік більш високих температур випробувань. Залежно від того, якою мірою кожний з цих факторів має переважальний вплив на дану сталь, і змінюється її поріг холодноламкості.

Відзначимо, що залежність K_{IC} від температури випробовувань теж має характер КВП (рис. 1). Проте у всіх випадках випробувань (коли одержували достовірні значення K_{IC}) мало місце квазікрихке руйнування, оскільки незалежно від температури випробувань реалізується макровідривний характер росту тріщин. Тому зафіксоване різке збільшення роботи поширення тріщини (з ростом температури випробувань) в умовах плоскої деформації не можна інтерпретувати як перехід від макрокрихкого до макров'язкого руйнування або як зміну макроплаского деформованого стану на макропласконапружений. Встановлення причин такої, здавалось би, невідповідності вимагає проведення фактографічного аналізу мікрOMEХАНІЗМУ руйнування сталі, що нами було пророблено, а його результат описано трохи нижче.

Порівняння результатів випробувань на K_{IC} і ударну в'язкість (рис. 1 і 2) свідчить, що в той час, як ударна в'язкість в межах температур від 73К до 173К для нормалізованої сталі 17Г1С-У залишається на низькому (практично постійному) рівні, значення K_{IC} зростають удвічі.

Ці дані вступають у протиріччя з методикою визначення K_{IC} за величиною ударної в'язкості, запропонованою в будівельних нормах України [2]. Згідно з останніми між K_{IC} і ударною в'язкістю існує прямопропорційний зв'язок: з ростом одного параметра збільшується й інший. Така невідповідність викликана тим, що ударна в'язкість визначається в області крихкого руйнування (рис.2), а параметр K_{IC} — на ділянці переходу від крихкого до квазів'язкого руйнування (рис. 1).

В'язкість руйнування і ударна в'язкість мають також різну структурну чутливість до величини зерна сталі [5, 6]. З метою вивчення цього питання були проведені випробування на ударну в'язкість нормалізованих зразків Менаже та з наведеними втомними тріщинами, виготовлених зі сталі 17Г1С-У з різними величинами зерна.

Частина зразків підлягала аустенізації при 1143К, а частина — при 1343К. Це дало можливість отримувати різну величину зерна. Зразки, які пройшли аустенізацію при 1343К, перекладали в піч, де була температура 1143К. Нормалізацію зразків у всіх випадках проводили від 1143К, що забезпечило однакові умови їх охолодження. Середній діаметр зерен дорівнював 0,0093мм ($t_a = 1143К$) і 0,067мм ($t_a = 1343К$).

З даних, наведених на рис.3, випливає, що зі збільшенням величини зерна верхній та нижній порого холодноламкості зсуваються в сторону більш високих температур, при цьому верхній поріг холодноламкості показав себе більш чутливою характеристикою, ніж нижній. Крутизна кривих холодноламкості падає за рахунок розширення інтервалу перехідних температур і внаслідок зменшення перепаду робіт при в'язкому та крихкому руйнуванні. Такі явища властиві як температурним залежностям для зразків Менаже (рис. 3, а), так і для зразків з попередньо нанесеними втомними тріщинами (рис. 3, б).

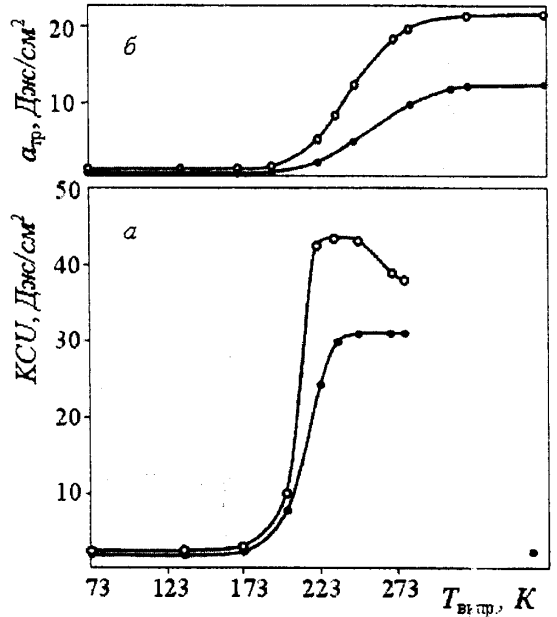


Рисунок 3 – Криві холодноламкості нормалізованої сталі 17Г1С-У
o – $t_a = 1143К$; • – $t_a = 1343К$

Отже, збільшення розмірів зерна веде до спаду обох складових ударної в'язкості: робіт зародження – a_3 і поширення – a_{tr} тріщини.

В той же час в роботі [6] встановлено, що значення K_{IC} для сталей зі збільшенням зерна залишаються постійними при низьких температурах випробувань, а при кімнатних температурах навіть зростають. Отже, останні результати досліджень свідчать зовсім не на користь запропонованої методики [2]. Непередбачену зміну характеру руйнування від в'язкого до крихкого можуть викликати й інші фактори, наприклад, конструктивні (зменшення радіуса надрізу ударних зразків, тобто перехід до більш жорсткого виду навантаження). На рисунку 4 наведені значення ударної в'язкості, які відповідають різним радіусам надрізу. Як видно, в області надрізів з меншим радіусом (< 0,1мм) крива 1 має дискретний перехід від в'язкої до крихкої в'язкості.

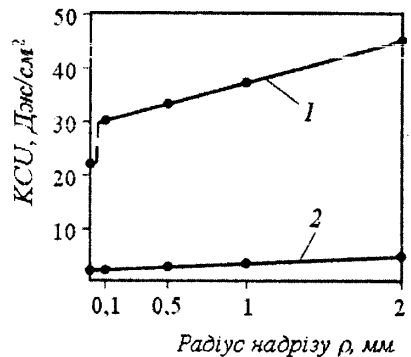


Рисунок 4 – Залежності ударної в'язкості від радіуса надрізу зразків, виготовлених зі сталі 17Г1С-У:

1 – нормалізована, $T_{випр.} = 293К$;
2 – $T_{випр.} = 370К$, $T_{випр.} = 203К$

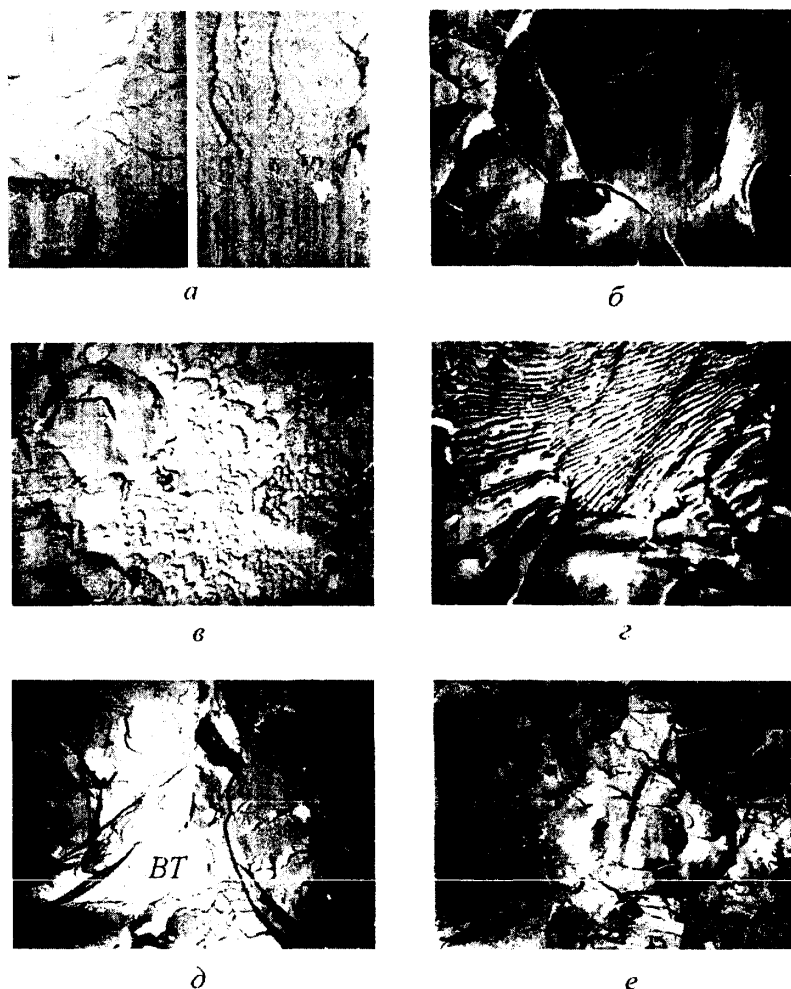


Рисунок 5 – Електронні фрактограми зламів зразків з нормалізованої сталі 17Г1С-У:
а, б, в, г – ударний згин; д, е – випробування на K_{IC} ; а, д – $T_{випр.}=73K$; б, в, г, е – $T_{випр.}=223K$. X4700

В той же час крива 2 відповідає значенням ударної в'язкості, за якими можуть бути визначені параметри K_{IC} згідно з методикою [2].

Наведені вище дані підтвердили результати електроннофрактографічного аналізу. Розглядали злами на трьох температурних ділянках руйнування: крихкій, нижче нижнього порогу холодноламкості t_x^H ; в'язкій, вище верхнього порогу холодноламкості t_x^B ; а також в проміжному інтервалі $t_x^H < t < t_x^B$. Вирішення питання про відповідність макро- і мікрохарактеру руйнування може бути одержане тільки за умови правильного вибору ділянок зламу, для яких проводиться фактографічна оцінка. Оскільки тип руйнування (крихкий чи в'язкий) визначається умовами поширення тріщини після досягнення нею критичного розміру, в будь-якому зламі необхідно, на наш погляд, розглядати перш за все ті ділянки, від яких починається руйнування, і ділянки, суміжні з ними. Такий прицільно-статистичний аналіз дає можливість більш правильно оцінити зв'язок мікробудови зламів з несучою здатністю матеріалу, ніж огульні статистичні оцінки мікробудови на всьому зламі, включаючи стадії кінцевого доламу.

При температурах $t > t_x^H$ злами мають мікро в'язкий характер, оскільки в них спостерігаються тільки димпли та гладкі ділянки в'язкого розшарування. При $t < t_x^H$ у зламах мають місце тільки крихкі мікроутворення. Це відкольні фасетки, які залежно від режиму термообробки та хімічного складу сталей можуть мати інтеркристалітний або транскристалітний характер. В діапазоні $t_x^H < t < t_x^B$ вказані ділянки зламу мають змішаний характер: тут спостерігаються як крихкі, так і в'язкі мікроутворення.

Електроннофрактографічний аналіз засвідчив, що у випадку допорогового крихкого руйнування нормалізованої сталі 17Г1С-У в зламі переважають типові відкольні фасетки (рис. 5, а). При цьому, як правило, спостерігається розмірна відповідність фасеток відколу з величиною феритних зерен, через які йде поширення тріщини (рис. 5, а, ліворуч). На відміну від феритних зерен поширення крихкого руйнування в перліті затруднене через наявність регулярно розміщених перепон у вигляді пластин цементиту, що чергуються (рис. 5, а, праворуч).

В'язке руйнування сталей супроводжується утворенням на поверхні зламу чітко вираже-

них димплів (рис. 5, б, в, г). Утворення димплів великих розмірів (рис. 5, б) пов'язане з коалісценцією мікропустот на ділянках, які переважають в структурі феритних зерен. Поширення в'язкої тріщини через перліт супроводжується утворенням роздіблених димплів (рис. 5, в), а в ряді випадків також великих димплів з характерною інфраструктурою, яка повторює структуру (пластин фериту та цементиту), що по чергово змінюється в перліті (рис. 5, г).

Викладені вище спостереження про відповідність в'язких і крихких мікроутворень в зламі різним ділянкам кривих холодноламкості поширюються також на випадок порогових температурних залежностей роботи поширення тріщини, зокрема K_{IC} (рис. 1). Оскільки порогове збільшення K_{IC} з ростом температури випробувань спостерігається в ряді досліджень методично беззаперечно коректних, його не можна інтерпретувати як недодержання умов відривного руйнування в плоскодеформованому стані. Це свідчить про необхідність введення уявлень про напружений і деформований стани 1-го і 2-го роду, а також про можливість їх невідповідності за типом. Саме у випадку макрокрихкого відривного поширення тріщини в зразках, призначених для оцінки K_{IC} , на верхньому порозі холодноламкості може бути реалізований мікроплосконапружений стан, який супроводжується утворенням типових в'язких мікроутворень, хоча інтегральна картина зламу, зумовлена дією результуючих сил, відповідає макровідриву. Згаданий випадок невідповідності макро- і мікрокартини руйнування може знайти свій вплив на різних умовах механічних випробувань. Зокрема, такий випадок характеризує поширення макровідривної тріщини при розтягу пластичних зразків на ділянці чашки.

У зв'язку з утворенням шийки, ріст початкової тріщини в чашці проходить при різко вираженій тривісності напруженого стану, хоча мікрорельєф цієї ділянки повсюдно волокнистий, і руйнування супроводжується утворенням відривних димплів.

На рис. 5, д, е представлені мікрофрактографічні структури зламів, які характеризують поширення тріщини на різних ділянках температурної залежності K_{IC} . Ці дані свідчать про те, що за наявності однакових за типом кривих холодноламкості має місце подібність в мікробудові зламів у зразках з попередньо утвореними тріщинами і у зразках із зламами, одержаними при інших видах випробувань.

Враховуючи викладені вище результати, слухно знову підняти питання про вивчення кореляційних зв'язків між параметрами K_{IC} та іншими показниками механічних властивостей матеріалів.

При випробуваннях на розтяг нормалізованих зразків у сталі 17Г1С-У замітили подібний характер температурних залежностей міцнісних характеристик (рис. 6) з температурними залежностями K_{IC} (рис. 1). Разом з тим в роботі [7] встановлений тісний взаємозв'язок між співвідношеннями K_{IC}/σ_B і $K_{IC}/(\sigma_B + \sigma_T)$.

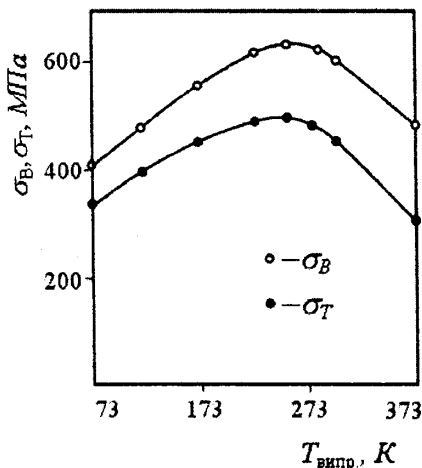


Рисунок 6 – Температурні залежності характеристик міцності нормалізованої сталі 17Г1С-У

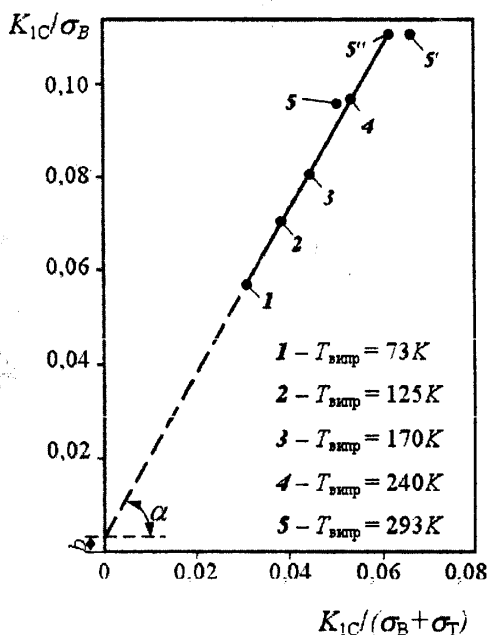


Рисунок 7 – Залежності $K_{IC}/\sigma_B - K_{IC}/(\sigma_B + \sigma_T)$, одержані при різних температурах випробувань нормалізованої сталі 17Г1С-У

Останній представлений на рис. 7 для п'яти різних температур випробування. Чотири точки (1, 2, 3 і 4) лягли практично на пряму лінію. Зауважимо, що у всіх цих випадках ми одержували коректні величини K_{IC} . Випробування при кімнатній температурі (293К) не дало можливості відзначити дійсне значення K_{IC} , а точка 5 (рис. 7) має відхилення від прямої лінії.

Отже, з аналізу рис. 7 випливає, що в прийнятих координатах дослідні дані достовірних значень K_{IC} задовільно розміщуються вздовж прямої лінії, яка описується рівнянням

$$\frac{K_{IC}}{\sigma_B} = k \frac{K_{IC}}{\sigma_B + \sigma_T} + b. \quad (1)$$

Звідси

$$K_{IC} = \frac{b}{1 - \frac{k}{\sigma_B + \sigma_T}}, \quad (2)$$

де k і b – постійні матеріалу.

Цей результат важливий тим, що, маючи дані випробувань на в'язкість руйнування сталі тільки при двох температурах (наприклад, 73К і 240К), можна з'єднати відповідні їм точки (в нашому випадку точки 1 і 4) прямою лінією і знайти величину K_{IC} для будь-якої температури випробувань, якщо відомі характеристики міцності розтягу і постійні матеріалу k і b . Останні визначають графічним або аналітичним методами. В першому випадку b і α заміряють на рисунку, причому $\text{tg}\alpha = k$ (див. рис. 7). Аналітичний метод дає більш точні підрахунки.

Знайдемо постійні k і b для досліджуваної нами сталі 17Г1С-У аналітичним методом. За співвідношеннями $K_{IC}/(\sigma_B + \sigma_{0,2})$ і K_{IC}/σ_B знаходимо координати точок 1 і 4: 1(0,032;0,057); 4(0,054;0,093).

Записавши рівняння прямої, яка проходить через ці дві точки, методами аналітичної геометрії отримали: $k = 1,636$; $b = 0,0046$.

За відомими значеннями k і b знайдемо за запропонованою формулою (2), наприклад, величину K_{IC} для сталі 17Г1С-У при температурі випробувань 293 К. Вона становить 65,7 МПа $\sqrt{м}$. На рис.7 цьому параметру буде відповідати точка 5', яка все ж децю зміщена від прямої вправо, що пояснюється відносно підвищеною пластичністю сталі при цій температурі випробувань. Якщо позначити на прямій лінії відповідну їй точку 5'', то останній буде відповідати значення $K_{IC} = 62,7$ МПа $\sqrt{м}$. Похибка в підрахунках буде становити 4,87%, що вказує на задовільну точність.

Отже, визначення величини K_{IC} за результатами випробувань на розтяг слід визнати досить перспективними.

Література

1. Трубопровідний транспорт газу / Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б. та ін. – К.: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.
2. ВБН В.2.3–00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.
3. ГОСТ 25.506-85. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (в'язкості руйнування) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
4. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4-х т. / Под общей ред. Панасюка В.В. – К.: Наукова думка, 1988. –Т.3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – 436 с.
5. Романив О.Н., Ткач А.Н., Крыськив А.С. О некоторых случаях различной структурной чувствительности вязкости разрушения и ударной вязкости // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – № 6. – С. 46-71.
6. Романив О.Н., Крыськив А.С., Ткач А.Н. Исследования обратной отпускной хрупкости сталей методами механики разрушения // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – №2. – С.41-46.
7. Олейник Н.В., Нго Ван Куэт. Определение вязкости разрушения материалов по их механическим свойствам // Проблемы прочности. – 1976. – №1. – С.72-77.

Третій російсько-український науковий семінар

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЇ (IAI-2003)

м. Київ

21-23 травня 2003 р.

Оргкомітет конференції

НТУУ "КПІ",

кафедра прикладної математики, к. 60
пр. Перемоги, 37, Київ, 02056, Україна

Тел.: +38 (044) 241 68 77

Тел./факс: +38 (044) 241 96 58

E-mail: taran@pma.ntu-kpi.kiev.ua

Iai@grail.kiev.ua

Напрямки роботи конференції:

- Інтелектуальний аналіз даних та машинне навчання
- Інтелектуальний пошук та аналіз інформації в локальних і глобальних мережах
- Правдоподібні міркування
- Прикладна семіотика
- Інструментальні засоби інтелектуального пошуку та аналізу інформації
- Нові напрямки інтелектуального аналізу інформації