

ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ І МЕХАНІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛДНОЛАМКОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ 17Г1С

Ю.Д. Петрина, С.С. Вуйцік

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42342,
e-mail: public@nung.edu.ua

Розглядається вплив вмісту марганцю, нікелю, кремнію, фосфору та сірки, розміру аустенітного зерна, наклепу та старіння сталей, а також радіуса надрізу, способу навантаження на характеристики холодноломкості трубної сталі 17Г1С. Встановлено, що найсуттєвіший вплив на зміну схильності сталі до холодноломкості під дією зазначених чинників чинить зміна енергії активації пластичної плинності.

Ключові слова: сталь 17Г1С, ударна в'язкість, крихке руйнування, пластична плинність, температура крихкості, наклеп, старіння.

Рассматривается влияние содержания марганца, никеля, кремния, фосфора и серы, размера аустенитного зерна, наклепа и старения, радиуса надреза, способа нагрузки на характеристики хладоломкости трубной стали 17Г1С. Установлено, что наибольшее влияние на изменение склонности стали к хладноломкости под воздействием указанных выше факторов имеет изменение энергии активации пластического течения.

Ключевые слова: сталь 17Г1С, ударная вязкость, хрупкое разрушение, пластическое течение, температура хрупкости, наклеп, старение.

Influencing of maintenance of manganese, nickel, silicon, phosphorus and sulphur, size of austenite corn, cold working and termal aging, radius of notch, method of loading on descriptions of the cold brittleness pipe steel 17Г1С is studied. The main influence on the change of inclination of steel to cold brittleness on influence of the factors resulted higher does the change of energy of activating of plastic flow is established.

Keywords: steel, impact toughness, brittle destruction, plastic flow, temperature of brittleness, cold working, termal aging.

Для оцінювання поточного технічного стану трубопроводу необхідно знати механічні характеристики металу [1], що визначаються шляхом експериментальних випробувань матеріалу конкретного трубопроводу під час комплексного діагностичного обстеження. Такі випробування обов'язково включають визначення ударної в'язкості за ГОСТ 9454-78. До того ж визначення ударної в'язкості за різних температур дає можливість здійснити якісне оцінювання схильності матеріалів до крихкого руйнування.

На характеристики крихкого руйнування сталі суттєво впливає масова частка хімічних елементів, що входять до її складу. Хімічний склад сталі 17Г1С, вибраної для експерименту, відповідав ТУ14-1-1950-77 (C-0,17%; Si~0,55%; Mn~1,4%; P~0,03%; S~0,025%; Ni~0,11%). Таким чином, вміст марганцю, кремнію, фосфору, сірки та нікелю в'язкість можуть змінювати ударну в'язкість сталі 17Г1С. Розмір аустенітного зерна, наклеп і старіння, радіус надрізу, способи навантаження, також можуть сприяти цьому ефекту. Тому питання вивчення впливу названих вище чинників на характеристики холодноломкості трубної сталі 17Г1С є актуальним і має велике практичне значення.

Розроблений одним з авторів цієї роботи метод математичного опису переходу сталі до крихкого стану під час випробування на ударну в'язкість [2] дає змогу прослідкувати вплив різних чинників на параметри крихкого руйнування. Так,

$$1 - \frac{KCV}{KCV_0} = \exp[-\epsilon \exp(-\frac{U}{kT})], \quad (1)$$

де: KCV – ударна в'язкість за температури T , KCV_0 – ударна в'язкість в температурній області повністю в'язких руйнувань; U – енергія активації пластичної плинності; ϵ – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від складу й структури сталі та умов випробувань; k – постійна Больцмана.

Величини ϵ , U і KCV_0 в цьому рівнянні повністю визначають температурну залежність ударної в'язкості даного матеріалу. З допомогою цього рівняння нами опрацьовані експериментальні дані низки досліджень і зроблена спроба їх аналізу.

Вплив марганцю, кремнію, нікелю, фосфору та сірки вивчався на прикладі базової сталі 17Г1С в нормалізованому стані. Вміст хімічних елементів змінювали шляхом переплавлення сталі 17Г1С з додаванням відповідних речовин у спеціально сконструйованій печі. Випробуванню на ударну в'язкість підлягали зразки Шаркі. За результатами цього дослідження визначено вплив вмісту марганцю в сталі на енергію активації пластичної плинності та нижню критичну температуру крихкості, що відповідає імовірності крихкого руйнування 0,9 (рис. 1 і 2). З підвищенням вмісту в сталі марганцю критична температура крихкості знижується (рис. 1), що повністю відповідає зменшенню енергії активації пластичної плинності (рис. 2). Ще більш

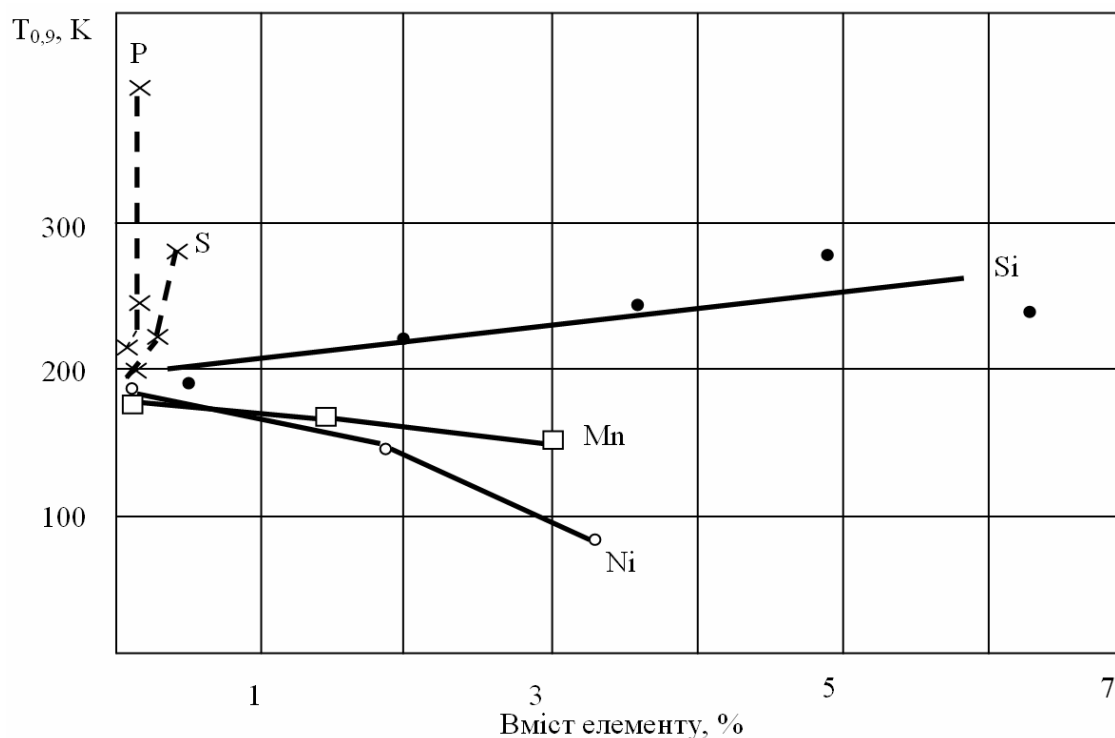


Рисунок 1 – Залежність нижньої критичної температури крихкості від вмісту елементів

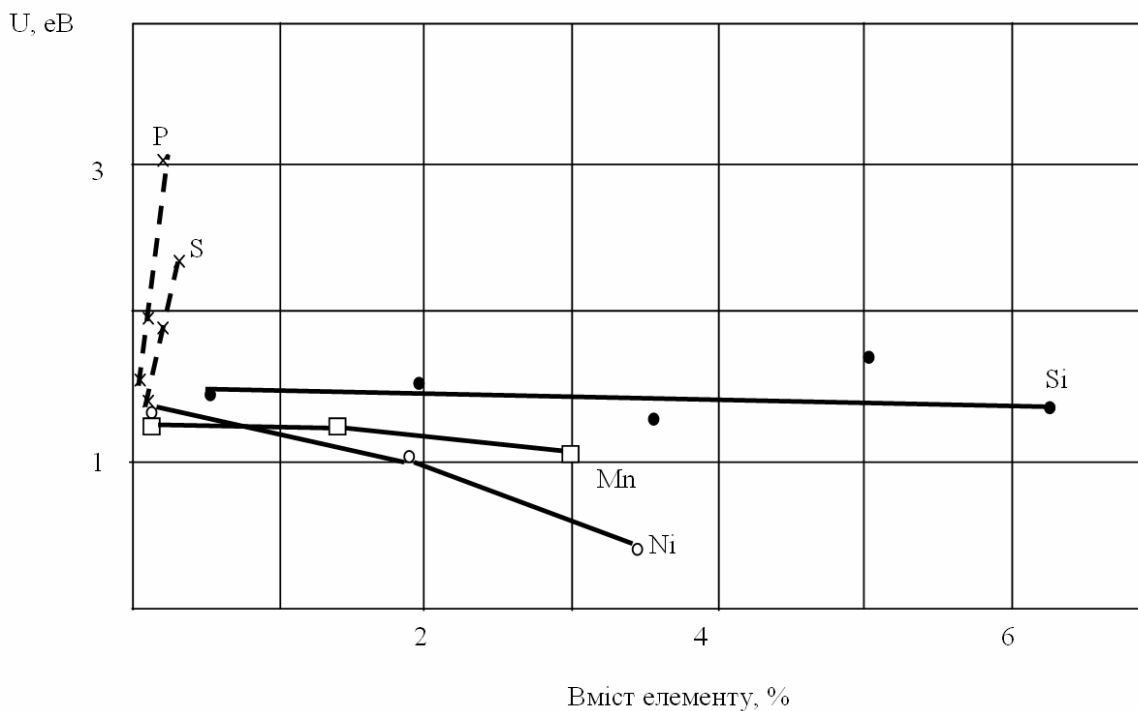


Рисунок 2 – Залежність енергії активації пластичної плинності сталей від масової частки елементів під час випробування на ударну в'язкість

позитивний ефект досягається при легуванні сталі нікелем. Пониження критичної температури крихкості із введенням у склад сталі до 3,5% нікелю добре відоме і широко застосовується на практиці. Для нижньої критичної температури це пониження досить суттєве і складає не менше 100К (рис. 1). Однак в процесі проектування трубопроводів необхідно пам'ятати, що використання легованих нікелем

сталей значно підвищує вартість конструкцій. За експлуатаційних температур, як правило, не трапляються випадки крихкого руйнування сталі трубопроводів.

На рис. 1 і 2 зображені також відповідні залежності для впливу фосфору та сірки. Навіть незначне підвищення вмісту фосфору та сірки суттєво погіршує характеристики холодноламкості сталі.

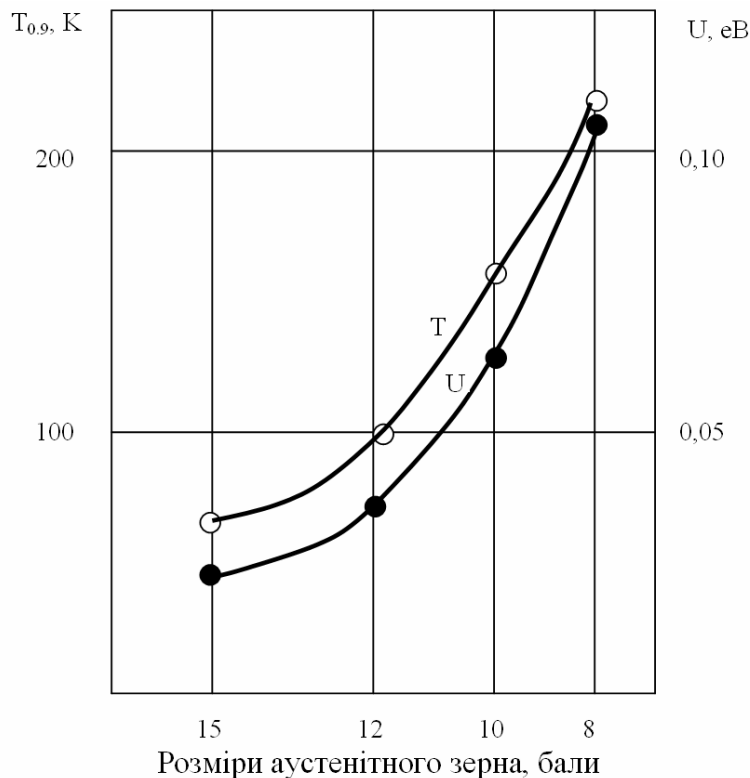


Рисунок 3 – Залежності нижньої критичної температури крихкості та енергії активації пластичної плинності сталі 17Г1С від розміру зерна аустеніту

При вивченні впливу кремнію, цей елемент знаходився в сталях у кількостях більших, ніж це потрібно для розкислювання. В цій області концентрацій кремній впливає на холодноламкості сталей негативно, хоча критична температура крихкості підвищується з ростом вмісту кремнію порівняно повільно (рис. 1).

Вплив підвищення вмісту кремнію на енергію активації пластичної плинності в досліджуваній сталі настільки невелике та незначене (рис. 2), що ним у першому наближенні можна знехтувати. Для кремнієвих сталей підвищення температури крихкості з підвищенням вмісту цього елемента визначається зменшенням величини передекспоненціального множника ϵ в рівнянні (1). Розв'язання рівняння (1) відносно T дає можливість визначити температуру, що відповідає заданій імовірності крихкого руйнування.

$$T = \frac{U}{k[\ln \epsilon - \ln(-\ln P)]} \quad (2)$$

З рівняння (2) видно, що підвищення температури крихкості при незмінному рівні енергії активації можливе у випадку зменшення передекспоненціального множника ϵ .

Підвищення критичних температур крихкості сталей з збільшенням вмісту фосфору та сірки пов'язане, очевидно, з підвищенням енергії активації пластичної плинності (рис. 1 і 2).

Зауважимо, що одночасно з підвищенням енергії активації відбувається збільшення передекспоненціального множника. Однак останнє не має в цьому випадку визначального значення.

Фосфор і сірка – це елементи, збільшення вмісту яких в сталі призводить до різкого підвищення енергії активації пластичної плинності. Навіть вуглець, який дуже сильно і негативно впливає на холодостійкість сталі, при збільшенні вмісту до $\sim 0,30\%$ знижує енергію активації пластичної плинності [3]. Тенденція до підвищення цієї енергії в серії сталей із змінним вмістом вуглецю спостерігається тільки у випадку зростання вмісту цього елемента більше $0,35\%$.

Фосфор сильно впливає на властивості фериту в зоні границь зерен, де відбувається сегрегація цього домішку [4]. Очевидно, сильне пересичення пограничних зон фосфором збільшує енергію блокування дислокацій або можливих джерел їх генерування, що й проявляється під час випробування на ударну в'язкість підвищенням енергії активації пластичної плинності.

У ході дослідження сталі 40Х [5] були отримані залежності ударної в'язкості від температур випробувань для різних станів цієї сталі, що відрізнялася розмірами аустенітних зерен. При цьому розміри зерен суттєво впливали на величину ударної в'язкості. Це спонукало нас до проведення аналогічних досліджень для сталі 17Г1С.

З метою отримання різних розмірів зерен проводили нормалізацію сталей за різних температур нагрівання. Обробка експериментальних даних цього дослідження дала результати, зображені на рис. 3. З укрупненням аустенітного зерна зростає енергія активації та аналогічно їй підвищується критична температура крихко-

Таблиця 1 – Вплив наклепу та старіння на характеристики холодноламкості сталі 17Г1С

| Стан сталі | Енергія активації U , eВ | Передекспоненціальний множник $ln v$ | Температура крихкості $T_{0,9}$, К |
|------------|-------------------------------|---|--|
| Вихідний | 0,308 | 12,93 | 240 |
| наклеп 2% | 0,587 | 24,10 | 260 |
| наклеп 6% | 0,397 | 16,41 | 247 |
| наклеп 10% | 0,387 | 15,70 | 250 |

сті. В даній серії дослідів зміна схильності до холодноламкості під дією варіації змінного чинника визначається зміною енергії активації, а не передекспоненціального множника v , хоча останній зі збільшенням розмірів аустенітного зерна зростає.

Якщо припустити, що довжина площини ковзання в сталі 17Г1С пропорційна діаметру аустенітного зерна d , то згідно [6] можна записати, що нижня границя плинності $\sigma_{т.пл.ж.}$ залежить від діаметра зерна аустеніту

$$\sigma_{т.пл.ж.} = \sigma_o + k \cdot d^{-1/2}, \quad (3)$$

де: σ_o – опір ґратки для вільної дислокації,
 k – константа.

Зі зростанням розміру зерна границя плинності повинна зменшуватися. То ж це значить, що питання про те, якому процесу початися – крихкому руйнуванню чи пластичній плинності – буде вирішуватися в сталі з більш крупним зерном при меншому напруженні. Відомо [7], що енергія активації пластичної плинності зростає із зменшенням діючого напруження. Існування такої залежності дає підстави припустити, що у випадку сталі 17Г1С з різним зерном аустеніту підвищення енергії активації пластичної плинності з укрупненням цього зерна пов'язане з пониженням границі плинності.

Механічні характеристики пластично деформованої трубноі сталі 17Г1С можуть суттєво відрізнитися від вихідних характеристик матеріалу [8]. Тому сталь досліджувалась у вихідному стані та після наклепу до 10% з наступним штучним старінням. Результати цього дослідження представлені в таблиці 1.

Основні параметри крихкого руйнування – енергія активації та передекспоненціальний множник – змінюються з ступенем наклепу немонокотонно. Найменший з досліджуваних ступенів наклепу викликає різке підвищення енергії активації та передекспоненціального множника. При цьому підвищується також критична температура крихкості. Старіння викликає посилення блокування дислокацій атмосферами атомів домішок, що повинно призводити до підвищення енергії активації процесу деблокування дислокацій. З іншого боку, наклеп зі старінням підвищує напруження плинності за рахунок підвищення щільності дислокацій, що пов'язане з зменшенням енергії активації. За мінімального з досліджуваних ступенів наклепу позитивний внесок першого з цих процесів в енергію активації більший, ніж негативний внесок другого. З подальшим підвищенням

ступеня наклепу спостерігається монотонне зменшення енергії активації. Цього й слід було очікувати, оскільки міцність блокування дислокацій атмосферами домішок при цьому суттєво не збільшується, а напруження, що виникають у металі з прикладанням зовнішнього навантаження, зростають через підвищення щільності дислокацій.

У випадку збільшення ступеня наклепу більше 2% також відбувається монотонне зменшення величини передекспоненціального множника. В кінці досліджуваного інтервалу ступенів наклепу зменшення величини передекспоненціального множника стає відносно більшим, ніж зменшення енергії активації. Тому критична температура крихкості, яка вже почала знижуватися зі збільшенням наклепу понад 2% у відповідності до зниження енергії активації, за ступенем наклепу 10% знову дещо підвищується.

Вплив гостроти надрізу на перехід сталі 17Г1С до крихкого стану у ході випробувань на ударний згин експериментально досліджували в роботі [9]. Результати обробки даних цього дослідження засвідчили, що енергія активації пластичної плинності змінюється із зменшенням радіуса надрізу немонотонно (рис. 4). Аналогічно енергії активації змінюється і величина передекспоненціального множника. З рис. 5 видно, що першочерговий вплив на нижню критичну температуру крихкості в цій серії дослідів зі збільшенням радіуса надрізу більше 0,1 мм має енергія активації. При переході до надрізу радіусом 0,01 мм цей вплив нівелюється впливом зміни передекспоненціального множника. Енергія активації зі зменшенням радіуса надрізу від 0,1 мм до 0,01 мм понижується з 0,328 до 0,244 eВ, а температура переходу до крихкого стану залишається при цьому практично незмінною – 261К і 259К відповідно.

Змінний чинник в даній серії дослідів – гострота надрізу – не пов'язаний із зміною структури металу, тож причину зміни енергії активації пластичної плинності зі зменшенням радіуса надрізу слід шукати в зміні напруженого стану в вершині надрізу.

Підвищення гостроти надрізу збільшує пікове значення напруження, що виникає у вершині цього концентратора. Це повинно було б призводити до зменшення енергії активації [7]. В даній серії дослідів під цю схему підпадає лише діапазон радіусів надрізу менше 0,1 мм. В області великих радіусів сильніше діє у зворотному напрямку якийсь інший чинник, причину якого з'ясувати не вдалось.

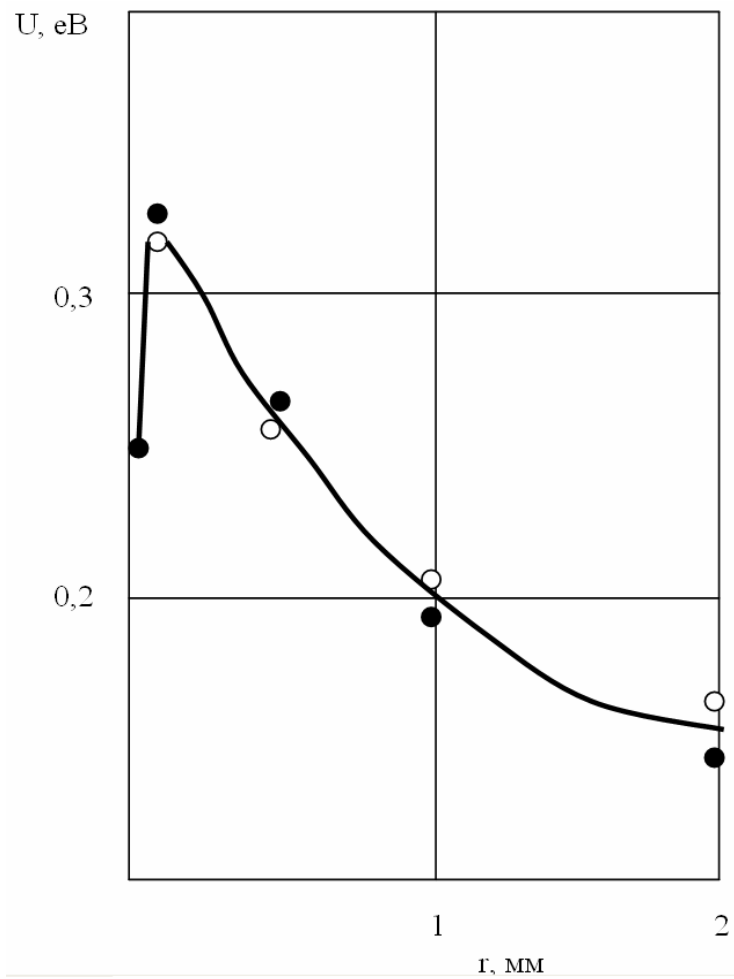


Рисунок 4 – Залежність енергії активації пластичної плинності сталі 17Г1С від гостроти надрізу ударного зразка

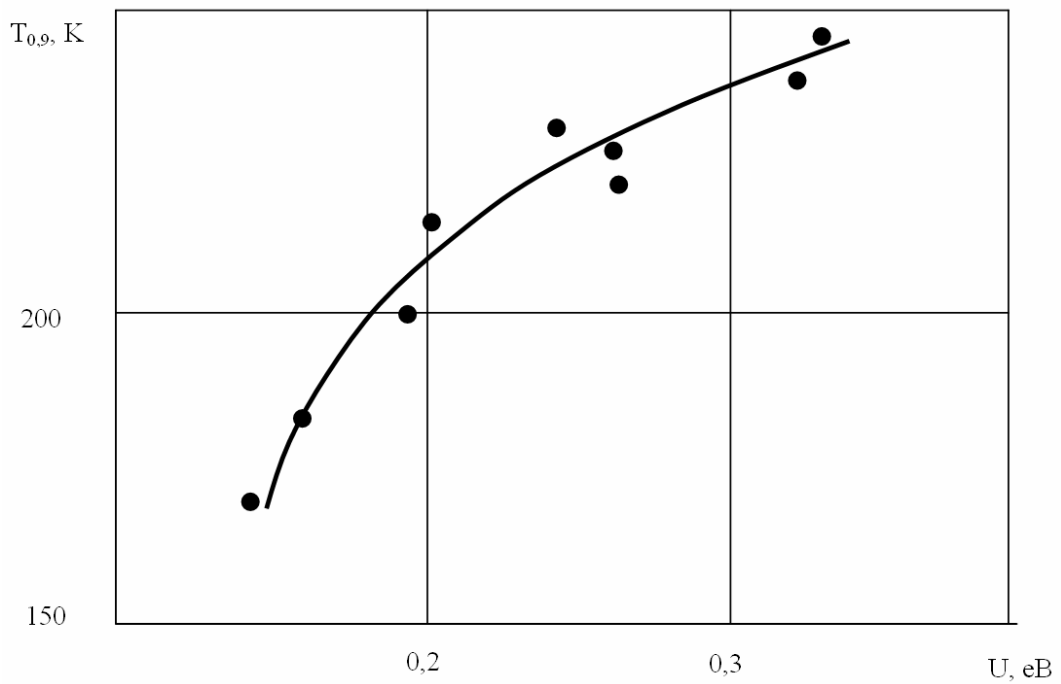


Рисунок 5 – Залежність нижньої критичної температури крихкості сталі 17Г1С на зразках із різною довжиною надрізу від енергії активації пластичної плинності

Таблиця 2 – Вплив способу навантаження на характеристики холодноломкості сталі 17Г1С

| Стан сталі | Енергія активації U , eВ | Передекспоненціальний множник $\ln v$ | Температура крихкості $T_{0,9}$, К |
|----------------|-------------------------------|--|--|
| Статичний згин | 0,118 | 6,07 | 165 |
| Ударний згин | 0,250 | 10,27 | 233 |
| Ударний розтяг | 0,067 | 6,47 | 93 |

В роботі [3] вказано, що характер кривих холоднокрихкості сталей суттєво залежить від способу навантаження досліджуваних зразків. Експериментально знайдені температурні залежності роботи руйнування при статичному згині, ударному згині та ударному розтягу.

Перехід від статичного згину до ударного супроводжується суттєвим підвищенням енергії активації та відносно меншим ростом перед експоненціального множника. Найбільш суттєво вплив на критичну температуру крихкості за такою зміною способу навантаження здійснює зміна енергії активації. Співвідношення $U / \ln v$ при статичному згині не виходить з меж, характерних для цього співвідношення у випадку ударного згину. При ударному розтягу даному значенню енергії активації відповідає значно більша величина передекспоненціального множника, ніж у разі випробування згином. Так само, як і зі зміною радіуса надрізу, в даному випадку пояснення впливу способу випробування на характеристики холодноломкості сталі слід шукати в особливостях напруженого стану, якими відрізняються види випробувань, і в можливій зміні напруженого стану в вершині надрізів різного радіуса в початковий момент деформування на площині плинності.

Висновок. Найсуттєвіший вплив на зміну схильності сталі 17Г1С до холодноломкості під дією різних структурних і механічних чинників здійснює зміна енергії активації пластичної плинності. Порівняно рідко вплив передекспоненціального множника стає настільки великим, що спостерігається підвищення критичної температури крихкості зі зниженням енергії активації пластичної плинності.

Щодо природи впливу різних чинників на величину енергії активації, то лише в окремих випадках можна висловити деякі попередні припущення, що потребують подальшої експериментальної перевірки.

Література

- 1 ВБН В.2.3.-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.
- 2 Петрина Д.Ю. Статична модель залежності ударної в'язкості трубної сталі 17Г1С від температури випробувань / Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4 (17). – С. 73-77.
- 3 Романив О.Н. Влияние структурных и механических факторов на характер кривых хладноломкости сталей / О.Н. Романив, Ю.Д. Петрина, Ю.В. Зима // Проблемы прочности. – 1973. – № 7. – С. 68-74.
- 4 Гуляев А.П. Чистая сталь / А.П. Гуляев – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.
- 5 Петрина Ю.Д. Влияние величины аустенитного зерна на склонность к хрупкому разрушению закаленной стали 40Х / Ю.Д. Петрина // Физ.-хим. механика материалов. – 1979. – № 1. – С. 81-83.
- 6 Петч Н. Металлографические аспекты разрушения / Петч Н., под ред. Либовица // Разрушение. – М.: Мир, 1973. – Т. 1. – С. 376-420.
- 7 Конрад Г. Текучесть и пластическое течение о.ц.к. металлов при низких температурах // Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1967. – С. 225-254.
- 8 Крижанівський Є. Механічні характеристики пластично деформованої трубної сталі 17Г1С / Є. Крижанівський, Д. Петрина, О. Онищук // Машинознавство. – 2005. – № 6 (95). – С. 35-38.
- 9 Крижанівський Є.І. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень / Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онищук, Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1 (6). – С. 6-11.

*Стаття постуила в редакційну колегію
02.07.10
Рекомендована до друку професором
В. Я. Грудзом*