

УДК 539.622:620

ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИМИ МЕТАЛАМИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ 17Г1С

Д. Ю. ПЕТРИНА¹, О. Л. КОЗАК¹, Б. Р. ШУЛЯР¹,
Ю. Д. ПЕТРИНА¹, М. І. ГРЕДІЛЬ²

¹ Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Виявлено позитивний вплив мікродомішок рідкісноземельних металів (РЗМ) на міцність, пластичність, ударну в'язкість і циклічну тріщиностійкість трубною сталі 17Г1С. Завдяки поділу ударної в'язкості на роботу зародження a_i і поширення a_p тріщини виявлено особливості в температурних залежностях a_p : за підвищених температур випроб, які забезпечують в'язке руйнування сталі, позитивний ефект від легування РЗМ зберігається, однак за понижених температур крихкого руйнування він стає негативним: робота a_p зменшується. Дистильована вода дещо знижує циклічну тріщиностійкість сталі, а позитивний ефект від домішок РЗМ проявляється тільки у підвищенні циклічної в'язкості руйнування сталі.

Ключові слова: труба сталь, легування мікродомішками рідкісноземельних металів, міцність, пластичність, ударна в'язкість, циклічна тріщиностійкість.

Практика тривалої експлуатації магістральних трубопроводів свідчить, що їх роботоздатність суттєво залежить від оптимального поєднання характеристик міцності та опору крихкому руйнуванню, а також корозійної тривкості сталей [1, 2]. Одним із методів поліпшення якості та механічних і корозійних властивостей металу є мікролегування трубних сталей та зварних швів елементами-модифікаторами, зокрема рідкісно- і лужноземельними металами [3–7]. Ефективність впливу таких мікродомішок пов'язана зі зміною морфології, розподілу і дисперсності структурних компонентів металу, а також складу і стану меж зерен. Встановлено, що високу тривкість проти загальної і пітингової корозії, сульфідного корозійного руйнування під напруженням низьколегованих сталей і зварних з'єднань можна досягти економним модифікуванням мікродомішками, які викликають глибокі структурно-фазові перетворення, що гальмують корозійні процеси. Обґрунтовано [8] оптимальний вміст (в %) модифікаторів для низьколегованої сталі (0,01...0,03 церію; 0,01...0,025 ітрію; 0,007...0,015 барію; 0,001...0,0025 кальцію; 0,02...0,04 цирконію) та зварного шва (0,01...0,02 церію; 0,015...0,022 ітрію; 0,0014...0,0025 барію; 0,0012...0,002 кальцію; 0,031...0,044 цирконію).

Однак цей перспективний напрям формування комплексу механічних властивостей трубних сталей потребує подальших досліджень. Нижче вивчено вплив домішок рідкісноземельних металів (РЗМ) на пластичність та опірність сталі 17Г1С крихкому руйнуванню.

Легували метал у лабораторних умовах методом електрошлакового переплаву двома складами мікродомішок (табл. 1). Склад № 1 відповідав запропонованому в праці [8] оптимальному вмісту модифікаторів для сталі 17Г1С (основного металу) (виходячи з підвищення мікролегуванням її корозійної тривкості). У складі № 2 вміст РЗМ приблизно удвічі вищий. Виконали дві виплавки сталі: А і В

Таблиця 1. Вміст мікродомішок РМЗ (в %) після легування сталі 17Г1С

| № складу домішок | Ce | Y | Ba | Ca | Zr |
|------------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 0,013 | 0,017 | 0,0011 | 0,0012 | 0,0027 |
| 2 | 0,033 | 0,032 | 0,025 | 0,0027 | 0,052 |

сталей, легованих РМЗ, мали нижчий вміст шкідливих домішок сірки і фосфору, які погіршують опірність металу крихкому та корозійно-механічному руйнуванню, а також водневому розтріскуванню [9].

та *C* і *D* (табл. 2). Кожну виплавку розливали у дві ємності, в одну з яких вводили РМЗ (дослідна і контрольна). Зауважили, що варіанти

Таблиця 2. Хімічний склад сталей, легованих РМЗ

| Спосіб виплавляння | Виплавка | Склад, % | | | | | |
|------------------------------|---------------------|----------|------|------|------|-------|-------|
| | | C | Si | Mn | Cr | S | P |
| З добавлянням РМЗ складу № 1 | Дослідна <i>A</i> | 0,17 | 0,43 | 1,23 | 0,13 | 0,019 | 0,021 |
| Без добавляння | Контрольна <i>B</i> | 0,17 | 0,41 | 1,17 | 0,11 | 0,028 | 0,029 |
| З добавлянням РМЗ складу № 2 | Дослідна <i>C</i> | 0,17 | 0,55 | 1,33 | 0,10 | 0,042 | 0,017 |
| Без добавляння | Контрольна <i>D</i> | 0,17 | 0,52 | 1,28 | 0,07 | 0,076 | 0,030 |

Визначали такі механічні властивості:

– характеристики міцності (σ_B , $\sigma_{0,2}$) та пластичності (δ , ψ) за розтягу гладких зразків діаметром робочої частини 4 mm;

– ударну в'язкість з використанням стандартних зразків з U-подібним (*KCU*, радіус надрізу $\rho = 1$ mm) і V-подібним (*KCV*, $\rho = 0,25$ mm) концентраторами напружень з побудовою серіальних кривих холодноламкості та V-подібних зразків з втомними тріщинами (*KCT*, за сумарної довжини концентратора і тріщини 5 mm);

– циклічну тріщиностійкість у лабораторному повітрі та дистильованій воді з побудовою кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) – залежностей швидкості росту втомної тріщини dl/dN від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK за частоти циклічного навантаження згином 1 Hz та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R = 0,8$ балкових зразків розмірами $8 \times 10 \times 160$ mm із боковим концентратором напружень.

Після обробки РМЗ спостерігали чітку тенденцію до підвищення і міцності, і пластичності сталей (табл. 3), при цьому відносне звуження ψ зростало помітніше, ніж відносне видовження δ . Таким чином, легуванням РМЗ можна підвищити пластичність сталі навіть за деякого росту характеристик міцності.

Таблиця 3. Міцність та пластичність сталей, легованих РМЗ

| Спосіб виплавляння | Виплавка | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ |
|------------------------------|---------------------|------------|----------------|----------|--------|
| | | МПа | | % | |
| З добавлянням РМЗ складу № 1 | Дослідна <i>A</i> | 545 | 433 | 27 | 65 |
| Без добавляння | Контрольна <i>B</i> | 534 | 427 | 26 | 61 |
| З добавлянням РМЗ складу № 2 | Дослідна <i>C</i> | 578 | 495 | 28 | 67 |
| Без добавляння | Контрольна <i>D</i> | 557 | 476 | 26 | 60 |

Позитивно вплинули домішки РМЗ і на ударну в'язкість сталі (рис. 1). Зазначимо, що сильніший ефект виявили за випроб зразків з U-подібним концентратором напружень більшого радіуса (рис. 1а). Для V-подібного концентратора (рис. 1б)

відмінності у значеннях KCV для контрольного і легованого РЗМ металів нівелюються зі зниженням температури у широкому діапазоні температур випроб.

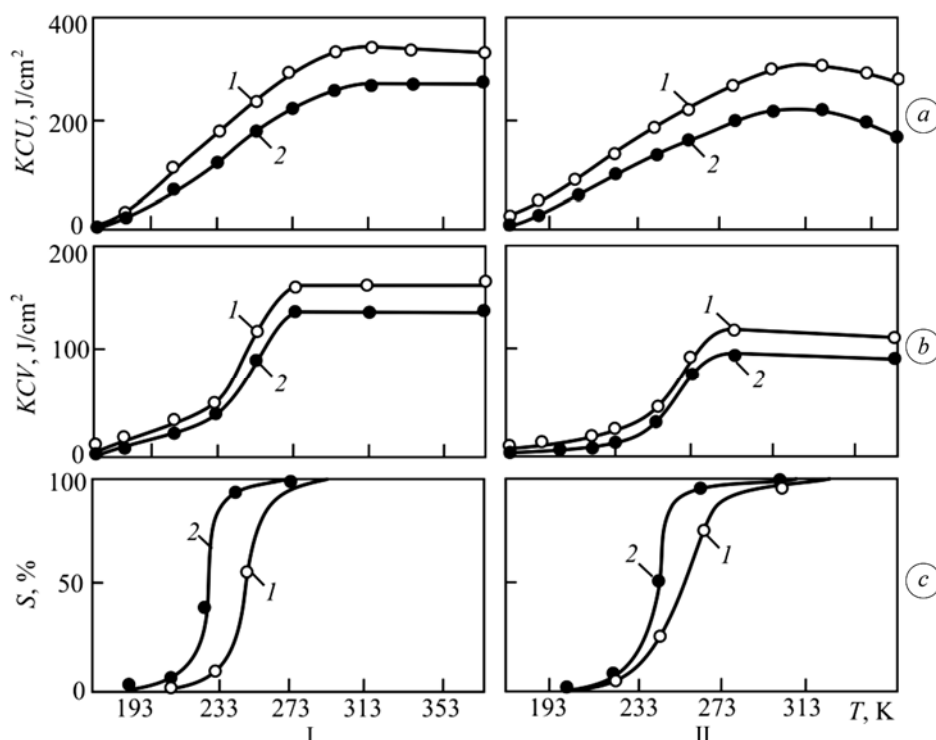


Рис. 1. Вплив температури випроб T на ударну в'язкість KCU за радіуса $\rho = 1$ mm (a) і KCV за $\rho = 0,25$ mm (b) та частку в'язкого складника S у зламах (c) сталі 17Г1С, оброблених (1) і необроблених (2) РЗМ: I – склад мікродомішок № 1; II – № 2.

Fig. 1. The effect of test temperature, T , on impact strength KCU at radius $\rho = 1$ mm (a) and KCV at $\rho = 0,25$ mm (b) and quantity of ductile component S in fracture surfaces of the 17Г1С steel with (1) and without (2) rarely earth metals: I – composition of microimpurities № 1; II – № 2.

Незвичними виявилися оцінки в'язкого (некристалічного) складника S у зламах зразків після ударних випроб (рис. 1c). Для контрольної (нелегованої РЗМ) сталі крива переходу від в'язкого зламу до крихкого (на 10...15°C) дещо зміщена у бік понижених температур порівняно з дослідною (легованою) сталлю. Це означає, що остання окрихчується за вищої температури, ніж звичайна, хоча криві холодноломкості за оцінками ударної в'язкості свідчать про протилежне.

Щоб з'ясувати причину такого протиріччя, побудували серіальні криві за показниками роботи зародження a_i і поширення a_p тріщини у сталі, легованій і нелегованій РЗМ (рис. 2). Використали відому методику Б. А. Дроздовського, який поділив загальну питому роботу руйнування на складники a_i і a_p і додатково використав зразки зі заздалегідь наведеними тріщинами [10]. Тоді за роботу a_p приймають ударну в'язкість зразків з тріщинами KCT , а за a_i – різницю між ударною в'язкістю KCU чи KCV та KCT . Для визначення KCT використали зразки з V-подібним концентратором.

Встановили, що у всьому діапазоні температур випроб значення a_i для сталі з РЗМ більші, ніж для контрольної (рис. 2b, c). На стадії поширення тріщини позитивний ефект від легування РЗМ зберігається лише для інтервалу температур, які відповідають в'язким зламам, тобто показник a_p вищий для дослідної сталі (рис. 2a). Водночас падіння температури випроб призводить до зміни взаємного

розміщення кривих роботи поширення тріщини. Як видно із залежностей $S = f(T)$ (рис. 1с), це пов'язано з появою кристалічних ділянок у зламі дослідної сталі.

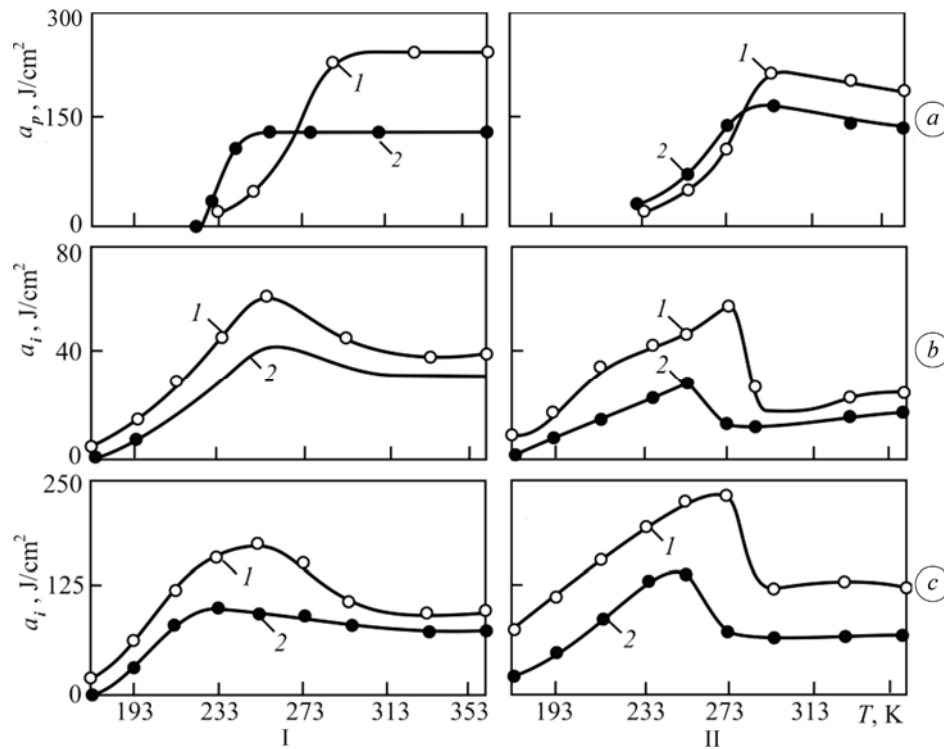


Рис. 2. Серіальні криві роботи поширення a_p (а) і зародження a_i (б: $\rho = 0,25$ mm, с: $\rho = 1$ mm) тріщини в обробленій (1) і необробленій (2) РЗМ сталі 17Г1С: I – довавлення РЗМ складу № 1; II – № 2.

Fig. 2. Serial curves of crack propagation a_p (a) and initiation a_i crack (b: $\rho = 0.25$ mm, c: $\rho = 1$ mm) in the 17Г1С steel with (1) and without (2) rarely earth metals: I – addition of microimpurities № 1; II – № 2.

Зрозумілою стає також вища чутливість показника KCU до домішок РМЗ порівняно з показником KCV , оскільки робота зародження тріщини для зразків з U-подібним концентратором більшого радіуса вища, ніж з V-подібним.

Виявлене для низьких температур зменшення значень a_p перекривається ростом параметра a_i , в результаті чого ударна в'язкість сталі з домішками РЗМ є вища за всіх температур випроб, хоча позитивний ефект і слабшає зі зниженням температури. Збільшення роботи a_i після обробки РЗМ пов'язане з деяким зменшенням вмісту неметалевих включень, а також зміною їх дисперсності та форми. За таких умов полегшується релаксація напружень внаслідок пластичної деформації, здатність до зародження тріщини падає і, відповідно, збільшується робота a_i .

Водночас роль неметалевих включень на стадії росту тріщини може бути різною залежно від механізму руйнування. За в'язкого вона негативна з тих самих причин, що і на стадії зародження тріщини, тоді як в інтервалі температур крихкого руйнування різниця у кількості включень практично не впливає на розвиток пластичної деформації в зламі, а отже, і на роботу поширення тріщини a_p . Можна припустити, що деяке її зменшення за цих температур пов'язане з тим, що зі зниженням концентрації неметалевих включень після обробки РЗМ зменшується кількість ефективних перешкод на шляху тріщини, яка розвивається за крихким механізмом. Тут можна говорити про деяку позитивну роль включень в розвитку тріщини, коли пластична деформація біля її вершини не визначає опору її поширенню.

Значимо, що механічні властивості за введення домішок РЗМ складу № 1 і № 2 змінюються майже однаково (див. рис. 1 і 2). Таким чином, раніше запропонований вміст РЗМ для поліпшення протикорозійних властивостей трубної сталі 17Г1С [8] можна вважати оптимальним і для отримання комплексу характеристик міцності, пластичності та ударної в'язкості.

Враховуючи це, вплив РЗМ на циклічну тріщиностійкість сталі оцінювали тільки для виплавки *A* і *B*. Про зміну опірності матеріалу втомному руйнуванню судили за пороговим значенням коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} , циклічною в'язкістю руйнування K_{fc} і швидкістю поширення втомної тріщини на середній ділянці КДВР. Різниця у швидкостях поширення втомних тріщин та в порогових значеннях K_{th} для звичайних сталей і з домішками РЗМ не виявили і за випроб у повітрі, і в дистильованій воді. Проте це не означає, що корозивне середовище не впливає на показник K_{th} (табл. 4), який знижувався для двох станів металу на ~24%.

Таблиця 4. Характеристики K_{th} і K_{fc} (в МПа) звичайної та з домішкою РЗМ складу № 1 сталі 17Г1С за випроб у лабораторному повітрі та дистильованій воді

| Спосіб виплавляння | Лабораторне повітря | | Дистильована вода | |
|------------------------------|---------------------|----------|-------------------|----------|
| | K_{th} | K_{fc} | K_{th} | K_{fc} |
| З добавлянням РЗМ складу № 1 | 5,48 | 93,1 | 4,78 | 81,3 |
| Без добавляння | 5,41 | 84,1 | 4,72 | 70,5 |

Однак виявлені деякі відмінності у впливі РЗМ на показник K_{fc} : він зростає за випроб у повітрі на ~10%, а у воді – на ~15%, тобто позитивний ефект від легування сильніший за дії корозивного середовища, хоч воно і знижує загалом циклічну в'язкість руйнування металу. Судячи з характеру позитивного впливу домішок РЗМ на ріст втомної тріщини, можна прогнозувати, що збільшення довговічності труб можна очікувати лише завдяки зростанню рівня K_{fc} .

ВИСНОВКИ

Легування трубної сталі 17Г1С мікродомішками рідкісноземельних металів підвищує її міцність та пластичність, а також збільшує опірність металу крихкому руйнуванню за ударною в'язкістю та циклічною тріщиностійкістю. Зі збільшенням деформаційної здатності в результаті обробки РЗМ ударна в'язкість сталі підвищується тільки за випроб зразків з округлим надрізом. Для звичайної сталі крихко-в'язкий перехід за зміною механізму руйнування дещо зміщений в область понижених температур проти дослідної, тоді як за ударною в'язкістю – до підвищених. Значення ударної в'язкості сталі з домішками РЗМ вищі за всіх температур випроб через зростання роботи зародження тріщини. Збільшувати вміст домішок РЗМ понад оптимальний для отримання високої корозійної тривкості сталі нерационально, оскільки її механічні властивості практично не змінюються. Агресивний вплив корозивного середовища типу дистильованої води на ріст втомних тріщин у сталі 17Г1С проявляється у зниженні циклічної в'язкості руйнування. Довговічність труб зі сталі 17Г1С з домішками РЗМ збільшується на стадії росту втомної тріщини через підвищення циклічної в'язкості руйнування сталі.

РЕЗЮМЕ. Виявлено положительное влияние микродобавок редкоземельных металлов (РЗМ) на прочность, пластичность, ударную вязкость и циклическую трещиностойкость трубной стали 17Г1С. Благодаря разделению ударной вязкости на работу зароджения a_i и распространения a_p трещины выявили особенности в температурных зависимостях a_p : за повышенных температур испытаний, обеспечивающих вязкое разрушение стали, положительный эффект от легирования РЗМ сохраняется, но при пониженных температурах хрупкого разрушения он становится отрицательным: понижается уровень a_p .

Дистиллированная вода несколько понижает циклическую трещиностойкость стали, а положительный эффект от добавок РЗМ проявляется только в повышении циклической вязкости разрушения стали.

SUMMARY. Positive effect of microimpurities of rarely earth metals (REM) on some mechanical properties of 17Г1С pipe steel: strength, plasticity, impact strength and cyclic crack growth resistance is shown. Division of impact toughness into the components of crack initiation a_i and crack propagation a_p reveals the peculiarities in the temperature dependences a_p ; at higher testing temperatures providing the ductile fracture of steel, the positive effect of REM alloying is preserved but it becomes negative at the decreased temperatures of brittle fracture, decreasing the a_p level. Distilled water reduces the fatigue crack growth resistance of steel and the positive effect of REM is revealed in a rising cyclic fracture toughness only.

1. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 11–20.
(Kryzhanivskiy E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 127–136.)
2. Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко та ін. // Там же. – 2008. – 44, № 5. – С. 29–37.
(Tsyurul'nyk O. T., Slobodyan Z. V., Zvirko O. I., Hredil' M. I., Nykyforchyn H. M., and Gabetta G. Influence of operation of Kh52 steel on corrosion processes in a model solution of gas condensate // Materials Science. – 2008. – 44, № 5. – P. 619–629.)
3. Влияние модифицирующих микродобавок на коррозионную стойкость сварных соединений из низколегированной стали / В. Д. Макаренко, В. А. Беляев, Е. Н. Галиченко и др. // Сварочное производство. – 2000. – № 9. – С. 3–8.
4. Влияние модифицирующих микродобавок на механические и вязкопластические свойства сварных соединений нефтегазопроводов / В. Д. Макаренко, В. А. Беляев, Е. Н. Галиченко и др. // Там же. – 2001. – № 5. – С. 9–14.
5. Влияние модифицирующих микродобавок на коррозионную стойкость сварных соединений нефтегазопроводов / В. Д. Макаренко, В. А. Беляев, Е. Н. Галиченко и др. // Там же. – 2001. – № 4. – С. 13–19.
6. Чернов В. Ю. Влияние микродобавок на сопротивление хрупкому разрушению сварных соединений нефтепроводов // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – 37, № 3. – С. 110–113.
(Chernov V. Yu. Influence of Microadditions on the Resistance to Brittle Fracture of Welded Joints of Oil Pipelines // Materials Science. – 2002. – 37, № 3. – P. 449–454.)
7. Макаренко В. Д., Петровский В. А., Чернов В. Ю. Механизм водородного расслоения трубных сталей нефтегазопроводов // Там же. – 2003. – 38, № 6. – С. 111–114.
(Makarenko V. D., Petrovs'kyi V. A., and Chernov V. Yu. Mechanism of Hydrogen Delamination of Pipe Steels of Oil and Gas Pipelines // Materials Science. – 2003. – 38, № 6. – P. 895–900.)
8. Чернов В. Ю. Науково-прикладні основи забезпечення експлуатаційної надійності промислових трубопроводів при низьких температурах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Івано-Франківськ, 2003. – 32 с.
9. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання // Наук.-техн. пос. у 3-х т. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 455 с.
10. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 10 с.

Одержано 07.06.2012