

УДК 620.178

### Ю. Д. Петрина, Б. Р. Шуляр КОНСТРУКТИВНА В'ЯЗКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НАФТО- І ГАЗОПРОВОДІВ

*Проведені порівняльні дослідження конструктивної в'язкості різних зон зварних з'єднань магістральних нафто- і газопроводів. Показано, що експлуатаційні чинники мають значний вплив на механічні характеристики пришовної області, що дає додаткову інформацію для прогнозування залишкового ресурсу зварних з'єднань трубопроводів.*

*Ключові слова:* зварні з'єднання, пришовна зона, матеріал шва, зона шва, зона сплавлення.

*Рис. 4. Табл. 3. Літ. 8.*

### Ю. Д. Петрина, Б. Р. Шуляр КОНСТРУКТИВНАЯ ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НАФТО- И ГАЗОПРОВОДОВ

*Проведенные сравнительные исследования конструктивной вязкости различных зон сварных соединений магистральных нафто- и газопроводов. Показано, что эксплуатационные факторы оказывают значительное влияние на механические характеристики околошовной области, дает дополнительную информацию для прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений трубопроводов.*

*Ключевые слова:* сварные соединения, околошовная зона, материал шва, зона шва, зона сплавления.

### J. D. Petryna, B. R. Shuliar CONSTRUCTION TOUGHNESS OF WELDED JOINTS OIL AND GAS TRUNK PIPES

*A comparative analysis structural toughness welded joints' of different zones main oil and gas pipelines was made. It is shown that the performance factors have a significant influence on the mechanical properties welded area that provides additional information to predict the residual life of welded joints of pipelines.*

*Keywords:* welded connection, welded zone, joint material, zone of the weld, zone by fusing.

**Вступ.** Оцінювання працездатності нафто- і газопроводів є особливо актуальним завданням для України. Адже більшість з них або відпрацювали свій розрахунковий ресурс, або знаходяться на межі цього [1]. Тому не прогнозовані руйнування таких конструкцій приводять до великих економічних втрат і важких екологічних наслідків. Останнім часом зварні з'єднання сягають до 80% усіх відмов нафто- і газопроводів. Це пояснюється їх макро- і мікронеоднорідністю за структурою, хімічним складом і механічними властивостями [2, 3]. Звідси останнім часом значну увагу приділяють вивченню міцності, пластичності та в'язкості руйнування зварних з'єднань, які представляють собою найбільш небезпечні місця трубопроводів. Вивчення механічних характеристик пришовної області може дати додаткову інформацію для прогнозування надійності та довговічності зварних з'єднань. В зв'язку з цим такі дослідження були проведені в даній роботі.

**Матеріали і методика експерименту.** Дослідження виконували на трубній сталі X52. Порядок проведення випробувань і обробка результатів регламентовані роботами [4 – 6].

**Результати досліджень.** Якість зварного з'єднання початково завжди перевіряється вимірюванням твердості поперек його осі. Як видно з даних, представлених на рис.1, характеристики твердості матеріалу шва (МШ) вищі за відповідні показники основного металу (ОМ), що відповідає вимогам чинного регламенту на виконання зварного з'єднання (ЗЗ) [7].

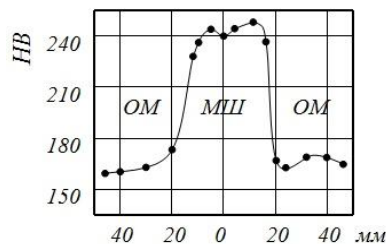


Рис. 1. Розподіл твердості поперек осі зварного з'єднання сталі X52

Після цього ми перейшли до ударних випробувань, які проводили на зразках з радіусом надрізу  $R=0,25$  мм. Результати серіальних температурних випробувань цих зразків приведені на рис. 2а.

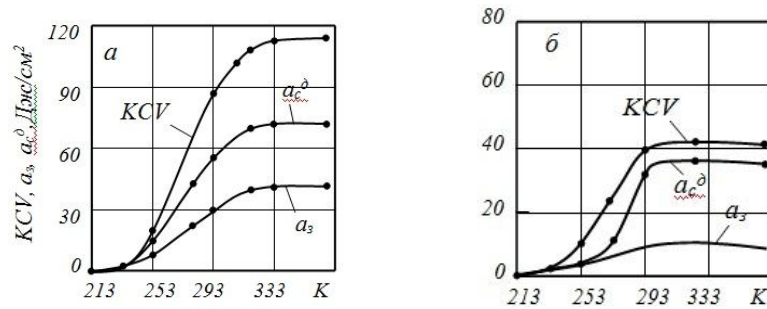


Рис. 2. Залежності ударної в'язкості та її складових матеріалу шва зварного з'єднання (а) та основного матеріалу (б) від температури випробувань

Порівнюючи отримані дані залежності для матеріалу шва зварного з'єднання з аналогічними залежностями для основного матеріалу (див. рис. 2б) ми бачимо зростання ударної в'язкості МШ порівняно з відповідним показником ОМ. Однак, якщо збільшення твердості відбулося в 1,5 разів, то величина ударної в'язкості KCV зросла майже в 2,5 разів. Нижня критична температура холодноламокості залишилась практично на попередньому рівні, а верхня – змістилася приблизно на 40 K в сторону вищих температур. Проте за верхньої критичної температури ОМ ударна в'язкість МШ було все таки в  $\sim 2$  рази вищою, ніж аналогічний показник для ОМ.

Аналіз складових ударної в'язкості МШ показав, що тенденцію до зростання порівняно з відповідними характеристиками ОМ мали як робота зародженню тріщини ( $a_3$ ), так і робота її поширенню ( $a_c^{\partial}$ ). Однак характер цього зростання був різний. Якщо робота зародженню тріщини МШ збільшилася приблизно в 4,1 разів, то робота поширенню тріщини – тільки приблизно в 1,9 разів. Тобто, основний показник, за рахунок якого пройшло зростання ударної в'язкості KCV матеріалу шва порівняно з основним металом, була робота зародження тріщини. Оскільки опір поширенню тріщини визначає схильність матеріалу до крихкого руйнування, то з цієї точки зору МШ має переваги перед ОМ.

Прищільне вивчення тріщиностійкості пришовної області на вузькій смузі не проводилось через відсутність надійної методики з гарантування диференціації окремих зон такої області. В даній роботі зроблена спроба дослідити тріщиностійкість металу окремих зон пришовної області зварних з'єднань трубопроводів за умов втомних і статичних навантажень.

В цих експериментах крім сталі X52 додатково використали трубку сталь 20.

Дослідження на тріщиностійкість пришовної зони зварних з'єднань трубопроводів за втомних навантажень служили, з одного боку, підготовчою стадією для ініціювання втомних кільцевих тріщин у циліндричних зразках для визначення параметрів в'язкості руйнування ( $K_C$ ,  $K_{IC}$ ) в умовах статичних випробувань, з іншого боку, вони проводились з метою вивчення опору матеріалу утворенню тріщини регламентованої глибини в залежності від її місцезнаходження в певній зоні зварного з'єднання.

Експерименти виконували за методикою, суть якої викладена в роботі [5], яка зводилася до циклічного тренування циліндричного зразка з кільцевим концентратором шляхом кругового згину з частотою 49 циклів за хвилину на повітрі та в присутності дистильованої води. У результаті за певну кількість циклів втомного деформування на дні кільцевого концентратора зароджувалася кільцева тріщина, яка потім поширювалася у глибину зразка. За контрольну умовно була прийнята кільцева тріщина глибиною 1 мм. Число циклів  $N_3$ , необхідне для утворення кільцевої тріщини вказаної глибини, залежить не тільки від рівня згинаючого моменту, що використовувався при тренуванні, але й від виду середовища. В таблиці 1 наведені встановлені дослідними величини числа циклів  $N_3$  в залежності від рівня згинаючого моменту в робочому перерізі зразка М і виду робочого середовища в різних зонах зварних з'єднань сталей X52 і 20.

Число циклів  $N_3$  на утворення тріщини було найбільшим для матеріалу зони шва (ЗШ) за всіх випадків експериментального дослідження. Трохи нижчими були показники  $N_3$  для основного матеріалу (ОМ). Найменшими були значення  $N_3$  для зони сплавлення (ЗС). Величини  $N_3$  для зони термічного впливу займали проміжне становище між ОМ і ЗС. Причому ця тенденція зберігалась для ЗС обох сталей як при випробуваннях на повітрі, так і в дистильованій воді. Присутність води повсемісно приводила до зниженню опору сталей утворенню тріщини. Однак інтенсивність цього

Таблиця 1. Ріст втомних тріщин у різних зонах зварних з'єднань сталі X52 і 20

Зона з утвореною тріщиною	М, Нм							
	50				29			
	Сталь X52		Сталь 20		Сталь X52		Сталь 20	
	повітря	вода	повітря	вода	повітря	вода	повітря	вода
Основний матеріал	5420	4200	5220	4020	34000	29600	31300	27400
Зона шва	5680	4380	5350	4120	37000	31500	33100	28700
Зона сплавлення	4230	2680	3980	2500	23000	17000	19500	13900
Зона термічного впливу	5200	4230	4760	4760	32000	26700	28200	23700

процесу в різних зонах була неоднаковою. Так в ОМ та ЗШ за згинаючого моменту 50 Нм спад  $N_3$  був у межах 22...23 %, а за згинаючого моменту 29 Нм – 12,5...13,3 %. Найбільш помітне зменшення  $N_3$  становило відповідно ~ 37% і ~ 29% у ЗС. Для ЗТВ ці показники займали проміжне становище (~ 20% і ~ 17% відповідно). Докази полегшення поширення втомних тріщин у воді порівняно з повітрям одержали електроннофрактографічним аналізом зламів зразків X52 (рис. 3), який був проведений д.т.н., Д. Ю. Петриною.

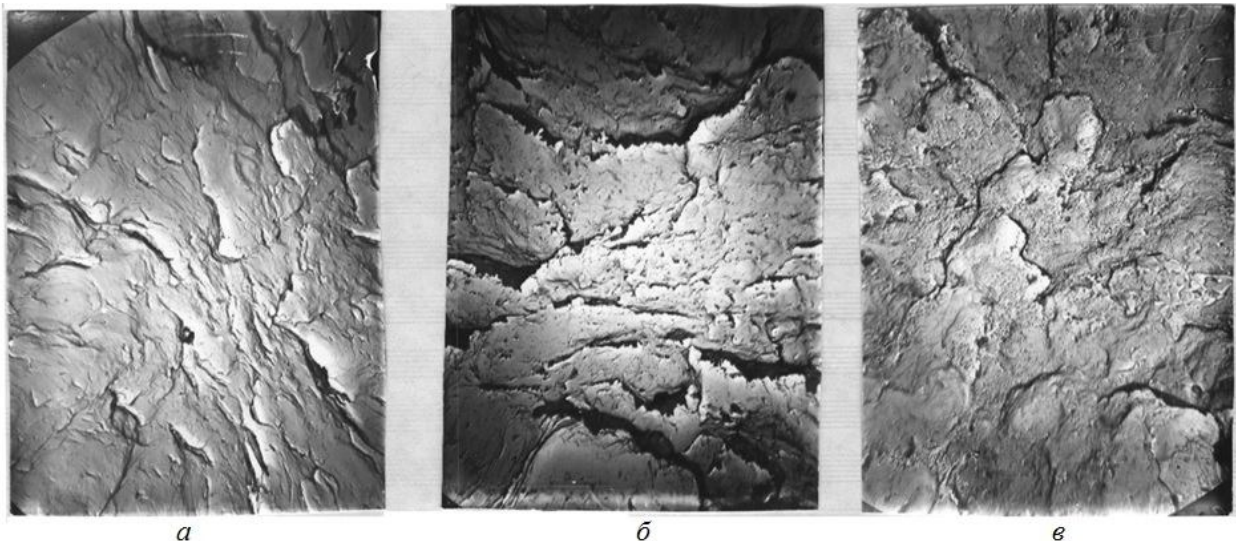


Рис. 3. Фрактограми зламів зразків, що відповідають втомному поширенню тріщини на повітрі (а) та у воді (б, в)

При випробуванні на повітрі на мікроповерхні руйнування переважають нерегулярні з багато чисельними розривами боріздки. Їх можна віднести до в'язкого типу. Будова цих боріздок свідчить про існування суттєвої мікропластичної деформації при поширенні тріщини в кожному циклі (рис. 3а).

Під дією дистильованої води характер підростання тріщини різко змінюється (рис. 3б і в). В цьому випадку появляються типові чітко окреслені крихкі фасетки (рис. 3б). Їх наявність підкреслюється частими поперечними виривами, які називаються вторинними тріщинами. В окремих випадках такі фасетки були декоровані слідами корозії (рис. 3в). Такий характер зламу є типовим для корозійно – втомного руйнування сталі та свідчить про те, що в присутності дистильованої води поширення тріщини полегшується.

Дослідження з оцінювання тріщиностійкості пришовної зони зварних з'єднань трубопроводів за статичних навантажень передбачали вивчення в'язкості руйнування матеріалу пришовної області зварних з'єднань із сталей X52 і 20 шляхом визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_{IC}$  ( $K_C$ ). Методичні особливості проведення експериментів викладені в роботі [6]. Випробування проводили на повітрі та у дистильованій воді. Одержані результати наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Значення в'язкості руйнування  $K_C$  для різних зон зварних з'єднань сталей X52 і 20

Зона з утвореною тріщиною	Сталь X52		Сталь 20	
	повітря	вода	повітря	вода
Основний матеріал	126	118	119	113
Зона шва	130	124	124	118
Зона сплавлення	114	106	106	100
Зона термічного впливу	122	115	115	109

Оскільки розміри зразків не забезпечували умови плоско деформованого стану для коректного визначення характеристики  $K_{IC}$ , то опір крихкому руйнуванню в умовах статичного розтягу зразків оцінювали параметром  $K_C$ . З аналізу результатів випливає, що статична тріщиностійкість  $K_C$  для пришовної області змінюється за такою ж послідовністю як і після втомних випробувань, але з меншими перепадами величин  $K_C$  для всіх зон зварного з'єднання. Так, якщо перепад  $N_3$  при випробуванні сталі X52 за  $M=50\text{Нм}$  на повітрі між зонами сплавлення та шва становив  $\sim 30\%$ , то перепад  $K_C$  для цих же зон був всього біля 9%.

Дистильована вода приводить до спаду значень  $K_C$  для всіх зон зварного з'єднання сталей X52 і 20. Однак цей спад невеликий і становив у середньому біля 5%. В той же час за втомних випробуваннях даний ефект був набагато сильніший (в межах від 12,5% до 37%). Очевидно це пояснюється тим, що при втомних випробуваннях весь час відбувається контакт матеріалу з середовищем і адсорбційна дія середовища проявляє себе протягом всього часу тренування зразка і, отже, поступового поширення тріщини. При короткочасних випробуваннях адсорбційна дія води проявляє себе тільки в початковий момент навантаження зразка.

З метою визначення в'язкості руйнування за параметром  $K_{IC}$  ми провели серіальні температурні випробування зварного з'єднання сталі X52 в ЗШ та ЗС. Ці зони були вибрані тому, що вони мали відповідно найбільше та найменше значення  $K_C$ . Як видно з рис. 4 криві залежності параметрів в'язкості руйнування ЗШ і ЗС від температури випробувань мають характер крихко – в'язкого переходу.

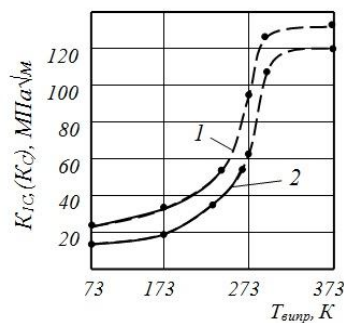


Рис. 4. Залежність характеристик в'язкості руйнування різних зон зварного з'єднання сталі X52 залежно від температури випробувань: 1 – зона шва; 2 – зона сплавлення

Відзначимо, що нижня критична температура крихкості ЗС зміщена вправо порівняно з ЗШ. Це вказує на підвищену чутливість ЗС до холодноламкості. З підвищенням температури випробувань величини  $K_{IC}$  для обох зон різко зростають. Коли  $K_{IC}$  досягає значення  $\sim 55$  МПа умови плоского деформування перестають виконуватися і оцінка цього параметру стає недостовірною. Тому з подальшим підвищенням температури випробувань в'язкість руйнування ЗШ і ЗС оцінюється за характеристикою  $K_C$  (пунктирні лінії на кривій). З рис. 4 видно, що свого критичного значення  $K_{IC}=55$  МПа ЗС досягає при  $T_{\text{випр}} \approx 260$  К, а ЗШ при  $T_{\text{випр}} \approx 235$  К. Різниця між

цими температурами в  $\sim 25$  К ще раз підтверджує про більшу схильність ЗС до крихкого руйнування, ніж ЗШ.

В роботі [8] дана науково обґрунтована основа доцільності оцінювання опору поширення тріщини трубної сталі 17Г1С за  $\delta_K$  – критерієм. Оскільки за звичних температур роботи магістральних трубопроводів провести оцінку в'язкості руйнування за  $K_{1C}$  різних зон зварного з'єднання неможливо, нами зроблена спроба здійснити таке оцінювання за критерієм  $\delta_K$ . Результати цього експерименту наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Значення в'язкості руйнування  $\delta_K$  для різних зон зварного з'єднання сталі X52

Середовище	Зона з утвореною тріщиною			
	Основний матеріал	Зона шва	Зона сплавлення	Зона термічного впливу
Повітря	0,196	0,203	0,168	0,181
Вода	0,184	0,184	0,156	0,175

З приведених в таблиці 3 даних випливає, що в'язкість руйнування  $\delta_K$  для пришовної зони змінюється за такою ж послідовністю, як і за випробувань на  $K_C$ . Це підтверджує доцільність використання  $\delta_K$  – критерію для оцінювання в'язких властивостей різних зон зварного з'єднання трубопроводів.

**Висновки.** Встановлені особливості прояву та оцінювання конструктивної в'язкості різних зон зварних з'єднань нафто– і газопроводів за сумісної дії механічних навантажень, робочих температур і середовищ.

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк [та ін.] / Під ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: Спалах, 2009. – 504 с.
2. Петрина Д. Ю. Оцінювання деградації зварних з'єднань сталі 17Г1С магістрального трубопроводу / Д. Ю. Петрина // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2010. – № 3 (25). – С. 76-85.
3. Цирульник О. Т. Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина [та ін.] // Фіз.-Хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 5. – С. 55-59.
4. ГОСТ 9454-60. Метод определения ударной вязкости. – М.: Изд-во. стандартов, 1960. – 27 с.
5. РД 50-345-82. Методические указания. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
6. ГОСТ 25.506-85. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во. стандартов, 1985. – 62 с.
7. Ведомственные строительные нормы: ВСН 006-89. Сварка и контроль качества сварных соединений при сооружении магистральных газопроводов. – Утв. Миннефтегазстрой СССР 14.03.89. – М. – 1989. – 192 с.
8. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів з позиції  $\delta_H$ -моделі / Є. І. Крижанівський, В. П. Рудко, О. О. Онищук, Д. Ю. Петрина // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2002. – № 2(3). – С. 66-73.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2014.