

# МАШИНИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛИ

УДК 639.3:620.17:620.194

## ОЦІНКА В'ЯЗКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАСТИЧНО ДЕФОРМОВАНИХ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВІДІВ

<sup>1</sup>Ю.Д.Петрина, <sup>1</sup>Б.Р. Шуляр, <sup>1</sup>Д.Ю. Петрина, <sup>1</sup>Р.С. Яким, <sup>2</sup>П.Я. Сидор, <sup>1</sup>Т.П. Венгринюк<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727184,  
e-mail: public@nimg.edu.ua<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; 79601, м. Львів, вул. Наукова, 5,  
тел. (0322) 632133, e-mail: nykyfor@ipm.lviv.ua

У вирішенні важливої державної проблеми щодо забезпечення паливно-енергетичного комплексу сировиною важливу роль відіграють магістральні газопроводи. Їх працездатність забезпечується надійністю труб, що зі збільшенням термінів експлуатації весь час погіршується. Враховуючи, що більшість газопроводів перебуває в експлуатації 30 ... 40 років, матеріал їх зазнає інтенсивної деградації. Перевантаження, які можуть виникати внаслідок зсуву оточуючого ґрунту, надмірного згину труби при укладальних роботах на криволінійній трасі, падінні труб тощо, додатково погіршують стан трубопроводів. Такі чинники утворюють на окремих ділянках трубопроводів пластично деформовані зони. З перебігом часу вони, як правило, переростають в тріщини, що мають здатність розвиватися і створювати аварійні ситуації. Тому актуальність оцінки в'язких властивостей пластично деформованих сталей газопроводів не викликає жодних сумнівів.

Наведені результати експериментальних досліджень з визначення механічних характеристик пластично деформованих при перевантаженнях трубних сталей. Спад ударної в'язкості таких сталей зумовлений зниженням складової роботи поширення тріщини. Збільшення величини попередньої пластичної деформації зразків сталі Х52 спричиняє спад крутизни кривих холодноломкості.

Показано перспективи використання електрохімічних методів для розвитку неруйнівного методу контролю ударної в'язкості та статичної тріщиностійкості ( $K_{IC}$ ) попередньо пластично деформованих трубних сталей. Деформування стиском величиною відносною деформації 30 % експлуатованої впродовж тридцяти років трубної сталі Х52 практично не вплинуло на електрохімічні показники матеріалу. Це пов'язано з вичерпанням запасу пластичності та значною пошкоджуваністю деградованого металу.

Ключові слова: магістральний газопровід, трубна сталь Х52, деградація, електрохімічні показники, механічні властивості, ударна в'язкість.

В решении важной государственной проблемы обеспечения топливно-энергетического комплекса сырьем важную роль играют магистральные газопроводы. Их работоспособность обеспечивается надежным состоянием труб, которая с увеличением сроков эксплуатации постоянно ухудшается. Учитывая, что большинство газопроводов находится в эксплуатации 30 ... 40 лет, материал их поддается интенсивной деградации. Перегрузки, которые могут возникать вследствие сдвига окружающего грунта, чрезмерного изгиба трубы при укладочных работах на криволинейной трассе, падении труб и т.д., дополнительно ухудшают состояние трубопроводов. Такие факторы образуют на отдельных участках трубопроводов пластически деформированные зоны. Со временем они, как правило, превращаются в трещины, обладающие способностью развиваться и создавать аварийные ситуации. Поэтому актуальность оценки вязких свойств пластически деформированных сталей газопроводов не вызывает никаких сомнений.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению механических характеристик пластически деформированных при перегрузках трубных сталей. Спад ударной вязкости таких сталей обусловлен снижением составляющей работы распространения трещины. Увеличение величины предварительной пластической деформации образцов стали Х52 вызывает спад крутизны кривых хладноломкости.

Показаны перспективы использования электрохимических методов для развития неразрушающего метода контроля ударной вязкости и статической трещиностойкости ( $K_{IC}$ ) предварительно пластически деформированных трубных сталей. Деформирование сжатием величиной относительной деформации 30% эксплуатируемой на протяжении тридцати лет трубной стали Х52 практически не повлияло на электро-

химические показатели материала. Это связано с исчерпанием запаса пластичности и значительным повреждением деградированного металла.

Ключевые слова: магистральный газопровод, трубная сталь X52, деградация, электрохимические показатели, механические свойства, ударная вязкость.

*In completing important national security issues of ensure the fuel and energy complex of raw materials an important role play natural gas pipelines. Their performance provides a reliable state of pipes that with increasing the service life that is getting worse. Considering that most of the gas pipes is in operation 30 ... 40 years old, the material lends itself to their intensive degradation. Overload, which may be due to the shift of the surrounding soil, excessive bending of the pipe laying at work on a curved road, fall pipes, etc., further worsen the condition of the pipes. These factors form on separate pipelines plastically deformed zone. Over time, they tend to develop into a crack, having the ability to develop and create emergencies. Therefore, the evaluation of the toughness properties of plastically deformed steel pipelines can be no doubt in their relevance.*

*The results of experimental studies determining the mechanical properties of plastically deformed during overload pipe steels. Recession toughness of steels caused the lowering part of the crack propagation. Increase of preliminary plastic deformation of steel samples X52 is the steepness of the decline curves of cold brittleness.*

*The prospects of using electrochemical methods for the development of non-destructive testing method toughness and static fracture ( $K_{IC}$ ) previously plastically deformed pipe steels are shown. Compression deformation of the magnitude of the strain 30% operated for over thirty years of pipe steel X52 almost has no effect on the electrochemical performance of the material. This is due to the depletion of the reserve of plasticity and considerable damage to the degraded metal.*

Keywords: gas pipeline, pipe steel X52, degradation, electrochemical performance, mechanical properties, viscosity.

**Вступ.** Безперерійність роботи магістрального газопроводу забезпечується його надійним технічним станом, дані якого слугують базою для обґрунтування працездатності такої складної конструкції як на етапі проектування, так і експлуатації. При оцінці технічного стану трубопроводів проводять комплекс досліджень, які забезпечують збір і аналіз показників, що встановлюють фактичний стан трубної сталі [1]. Ця проблема особливо актуальна для потенційно небезпечних ділянок лінійної частини трубопроводів, які експлуатуються в екстремальних умовах під дією різних перевантажень [2].

**Аналіз сучасних досліджень і публікацій.** Такі перевантаження можуть виникати внаслідок зсувових переміщень оточуючого ґрунту [3, 4], надмірного згину труби при укладальних роботах на криволінійній трасі [5, 6] тощо. Ці додаткові експлуатаційні чинники утворюють на окремих ділянках трубопроводів пластично деформовані зони, які мають здатність переростати в тріщиновидні дефекти, що можуть розвиватися і створювати аварійні ситуації.

Тому останнім часом в Україні були створені нормативні документи [7, 8] з визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. В цих документах нормативні значення механічних характеристик матеріалу зразків такі: границя міцності  $\sigma_B$ , границя плинності  $\sigma_T$ , відносне видовження  $\delta$  та ударна в'язкість  $KCV$  за температури мінус 40°C.

В реальних конструкціях завжди наявні тріщини, тому їх цілісність, працездатність і надійність забезпечується енергомісткістю процесу розвитку тріщини. Отже, в'язкість металу за наявністю тріщини є визначальною. Її прийнято називати конструктивною в'язкістю [9, 10]. Вона є саме тією властивістю, яка забезпечує зменшення концентрації напружень у вершині тріщини, викликаючи її сповільнення. Чим більша в'язкість у вершині тріщини, тим за більш високих напружень можуть проходити

великі пластичні деформації. Саме через недостатню конструктивну в'язкість на практиці дуже часто не вдається реалізувати ту високу міцність, яку за теперішнього розвитку виробничих технологій можна забезпечити різними обробками матеріалів.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Конструктивна в'язкість характеризується здатністю металу чинити опір розвитку тріщини. Метал, не здатний чинити опору розвитку тріщини, крихкий. Однак умови переходу пластично деформованих зон трубопроводів і тріщиноподібні дефекти до останнього часу остаточно не визначені [3 – 8]. Деякі автори не враховують зсувові процеси ґрунтів [6]. Окремі дослідження з цієї проблеми проведені на сталях, які не використовуються в трубопроводному транспорті [9, 10]. Не до кінця вивчена роль температури випробувань на крихко-в'язкі переході трубних сталей.

Тому дослідження ударної в'язкості пластично деформованих трубних сталей має як наукову актуальність, так і народногосподарське значення.

**Мета роботи.** Враховуючи вищевикладені невирішені проблеми, метою статті є проведення оцінки в'язких властивостей пластично деформованих сталей газопроводів. Це дає додаткову інформацію для прогнозування надійності та довговічності пластично деформованих зон трубопроводів.

**Висвітлення основного матеріалу.** Експерименти проводили на зразках сталі 17Г1С, вирізаних із труби запасу діаметром 1220 мм і товщиною стінки 12 мм. Також використовували її зарубіжний аналог – трубну сталь італійського виробництва класу міцності X52, зразки якої вирізували з труби діаметром 275 мм і товщиною стінки 12 мм. Заготовки в останньому випадку отримували як з труб запасу, так і експлуатованих впродовж 30 років.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сталей

Сталь	C, %	Mn, %	Si, %	V, %	Nb, %	S, %	P, %	Al, %
17Г1С	0,20	1,3	0,4	-	-	<0,04	<0,01	<0,004
X52	0,23	0,94	0,33	0,015	0,03	0,018	0,006	0,02

Таблиця 2 – Механічні характеристики досліджуваних сталей

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	KCV <sub>-40°C</sub> , Дж/см <sup>2</sup>
17Г1С	510	363	20	39,6
X52	464	366	21	40,1

Таблиця 3 – Механічні характеристики трубних сталей 17Г1С і X52 після попередньої пластичної деформації стиском

$e_{nc}$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Сталь 17Г1С				
0	510	363	20,0	78
5	613	471	16,8	66
10	703	578	14,0	58
15	785	663	12,0	51
20	825	724	10,2	46
25	837	782	8,3	43
30	840	802	7,0	41
Сталь X52				
0	464	366	21,0	78
5	568	472	17,0	67
10	640	578	14,2	57
15	742	665	12,2	50
20	799	726	10,1	46
25	820	785	8,2	43
30	837	804	7,2	42

Хімічний склад і механічні властивості досліджуваних сталей труб запасу наведені в таблицях 1 і 2.

На рис. 1 зображена схема вирізання зразків з труби.

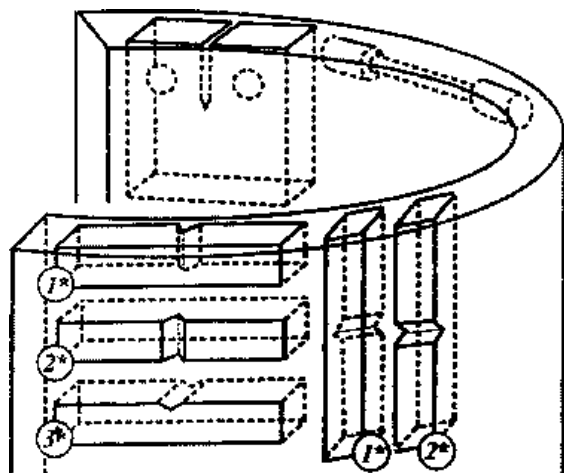


Рисунок 1 – Схема вирізання зразків із труби

Циліндричні зразки діаметром 4 мм і довжиною робочої частини 20 мм випробували роз-

тягом за швидкості деформування  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ c}^{-1}$  на універсальній випробувальній машині УМ-5А з метою визначення характеристик міцності та пластичності [11]. Випробування проводили з автоматичним записом діаграми навантаження в координатах «навантаження – переміщення активного захвату». Це давало можливість контролювати надання зразку певної величини заливкової попередньої пластичної деформації.

Ударну в'язкість КСВ визначали на стандартних зразках типу Шарпі за понижених, кімнатній і підвищених температурах [12]. Випробування проводили на маятниковому копрі КМ-5. Зразки вирізали як вздовж, так і впоперек твірної труби, а надріз наносили з боку внутрішньої (1), зовнішньої (2) поверхонь або вздовж стінки (3) труби (див. рис. 1).

Обробку заготовок з трубних сталей виконували тиском на лабораторному прокатному стані ДУО-150, швидкість прокатки становила 5 м/хв.

Електрохімічні дослідження проводили за методами [13].

Після прокатування зразків із трубних сталей 17Г1С і X52 їх піддавали випробуванням на розтяг. Отримані параметри механічних властивостей металів зведені до табл. 3.

Таблиця 4 – Ударна в'язкість зразків із досліджуваних сталей за різної орієнтації вирізок і нанесення надрізів

Сталь	KCV, Дж/см <sup>2</sup>				
	Упоперек твірної труби			Вздовж твірної труби	
	Орієнтація надрізу за рис. 1				
	1	2	3	1	2
Сталь 17Г1С	203	200	170	352	349
X52	198	197	168	350	348
X52 верх	72	76	70	182	198
X52 низ	77	73	72	187	197

Величину попередньої пластичної деформації стиском ( $e_{nc}$ ) визначали за формулою

$$e_{nc} = \frac{H - h}{H} \cdot 100\%,$$

де  $H$  – висота зразка до прокатування;  
 $h$  – висота зразка після прокатування.

Дані табл. 3 свідчать, що з ростом  $e_{nc}$  для обох досліджуваних сталей відбувається інтенсивне зростання границі міцності  $\sigma_B$  і границі пластичності  $\sigma_{0,2}$  та спад відносного видовження  $\delta$  і відносного звуження  $\psi$ .

Коли значення  $e_{nc}$  досягне 20 % величина  $\sigma_{0,2}$  зросте порівняно з вихідними даними сталей удвічі. В той же час зростання  $\sigma_B$  становило тільки 1,62 і 1,72 для сталей 17Г1С і X52 відповідно. Отже, зростання границі плинності  $\sigma_{0,2}$  більш інтенсивне порівняно з границею міцності  $\sigma_B$ . Тому різниця ( $\sigma_B - \sigma_{0,2}$ ) з ростом  $e_{nc}$  постійно зменшується. Так, для сталі 17Г1С у вихідному стані вона була 147 МПа, а за  $e_{nc} = 30\%$  – 38 МПа. Відповідно для сталі X52 ці різниці становили 98 МПа і 33 МПа. Майже удвічі зменшився параметр  $\psi$ . Однак найсуттєвіших змін зазнало відносне видовження  $\delta$ , величина якого після зростання  $e_{nc}$  до 30% зменшилася приблизно в три рази.

Відзначимо, що зростання попередньої пластичної деформації сталей до 30 % практично не вплинуло на зміни параметрів  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  і  $\psi$  обох досліджуваних сталей. Проте ці сталі у вихідних станах мали деяку різницю у величинах границі міцності, яка становила 46 МПа. Однак з ростом  $e_{nc}$  до 30% ця різниця поступово нівелювалася і в кінці випробувань становила лише 3 МПа.

Випробування на ударну в'язкість за Шарпі проводили на зразках із сталей 17Г1С і X52 за різної орієнтації вирізок з труби та нанесення надрізу (рис. 1). Результати досліджень подані в табл. 4.

Дві верхні сталі в табл. 4 відповідають значенням KCV зразків, вирізаних з труб запасу, а дві наступні – з труб, експлуатованих впродовж 30 років (сталь X52).

Деградовану сталь 17Г1С з метою економії дороговартісних досліджень не вивчали, оскільки поведінка сталей 17Г1С і X52 в усіх попередніх експериментах була ідентичною. Це підтверджується також відомими літературними даними [14, 15].

Деградацію властивостей сталей пов'язують з деформаційним зміщенням матеріалу [14]. Тому сталям властиве суттєве зниження ударної в'язкості у ході експлуатації. Воно більш виражене для шарів металу, які розміщені ближче до внутрішньої поверхні труби, а також для зразків, вирізаних упоперек твірної труби. Стосовно орієнтації надрізу, то у випадку його виконання вздовж стінки труби (3, див. рис. 1) величина KCV найнижча. Тому в подальших дослідженнях будемо випробовувати саме такий надріз. Оскільки попередня пластична деформація призводить до істотного зростання деформаційного зміцнення матеріалу, то це може суттєво знизити в'язкі властивості сталей, як і у випадку експлуатаційної деградації.

Дійсно, результати випробувань на ударну в'язкість (за Шарпі) зразків із сталі X52 показали, що збільшення величини  $e_{nc}$  спричиняє спад крутизни кривих холодноламкості (рис. 2). Цей спад відбувається з двох причин: 1) зменшення перепаду робіт за повністю в'язких і крихких руйнувань, 2) розширення інтервалу температур крихко-в'язкого переходу. Підвищення температур випробувань зсуває пороги холодноламкості (як верхній, так і нижній) у бік їх більш високих значень. Причому зміщення верхнього порогу холодноламкості відбувається інтенсивніше, ніж нижнього (рис. 3). Як наслідок, діапазон температур крихко-в'язкого переходу зростає.

Певні проблеми виникають при визначенні критичних температур верхнього і нижнього порогів холодноламкості. Найпростіше ця задача вирішується побудовою серіальних кривих в'язкої складової В у зламах сталі [6]. На рис. 4 зображено такі криві для зламів сталі X52.

В області температур, вищих за верхній поріг холодноламкості, злами мають в'язкі мікроутворення. До них належать, насамперед, димплові утворення, а також гладкі ділянки з характерним в'язким розшаруванням. В області температур, нижчих за нижній поріг холодноламкості, в зламах мають місце тільки крихкі

мікроутворення. Це відпальні фасетки, злами яких можуть мати транскристалітний або інтеркристалітний характер. В ділянці крихко-в'язкого переходу зламам наявні як крихкі, так і в'язкі мікроутворення. Підвищення температур випробовувань від нижнього до верхнього порогів холодноламкості призводить до зростання у зламах площі в'язких мікроутворень і спаду крихких.

При руйнуванні ударних зразків сталі X52 за температур до нижнього порогу холодноламкості у зламах наявні тільки відпальні фасетки (рис. 5 а, б). Встановлено розмірну відповідність відпальних фасеток з розмірами феритних зерен (рис. 5а). На відміну від зерен фериту, поширення тріщини в перліті утруднене. Це пояснюється тим, що в перліті наявні пластини цементиту, що регулярно чергуються і створюють перепони в поширенні тріщини (рис. 5б).

В'язке руйнування сталей електроннофрактографічний аналіз фіксує як утворення на поверхні зламів зразків чітко виражених димплів (рис. 5в, г, д, е). Їх розміри можуть бути різними. Утворенню димплів великих розмірів сприяє коалісценція мікрогустот у структурі зерен фериту (рис. 5в). Коли поширення в'язкої тріщини відбувається через перліт, спостерігали утворення димплів малих розмірів (рис. 5г). В окремих випадках руйнування мало місце утворення димплів великих розмірів. Однак їхня інфраструктура мала свої особливості: вона відтворювала структуру пластин фериту та цементиту, що по чергово змінювалися в перліті (рис. 5д). В області в'язкого руйнування в зламах сталі X52 з високим рівнем попередньої пластичної деформації ( $e_{nc} = 30\%$ ) димпли мають квазівідпальний незавершений характер (рис. 5е). Це пов'язано з чергуванням пластичності металу та бар'єрами, густо розміщеними в матриці [3, 4, 15]. Утворення бар'єрів пояснюється рухом дислокацій, пов'язаних з попередньо, пластичною деформацією. У деформованих матеріалах якісно змінюється механізм утворення димплів, що пояснює невисокий рівень енергетичних затрат при коалесценції мікрогустот.

Відомо, що складові ударної в'язкості дають більш повне уявлення при переход металу з в'язкого в крихкий стан [16], тому вивчали вплив температури випробовувань на ударну в'язкість і її складові трубної сталі X52. Для вирішення цієї задачі використовували зразки двох типів: 1) які не проходили попередню пластичну деформацію; 2) деформовані за найбільш використовуваних нами значень обтискання ( $e_{nc} = 30\%$ ).

Використання у випробовуваннях зразків з конструктивним концентратором підвищеної гостроти (з нанесеною втомною тріщиною в його вершині) різко змінює картину крихко-в'язкого переходу сталі X52 (рис. 6). Нижня температура холодноламкості суттєво змінюється в бік вищих температур випробувань, що призводить до звуження інтервалу крихко-в'язкого переходу. Певний зсув вправо має і верхня температура холодноламкості, але він незначний.

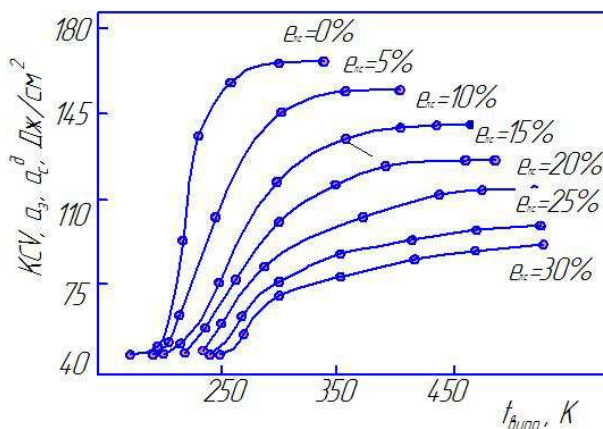


Рисунок 2 – Вплив температури випробовувань і величини попередньої пластичної деформації на ударну в'язкість деформованої сталі X52

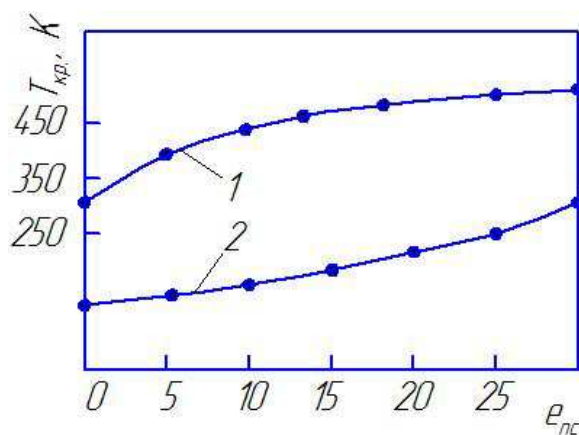


Рисунок 3 – Вплив величини попередньої пластичної деформації на критичні температури верхнього (1) і нижнього (2) порогів холодноламкості деформованої сталі X52

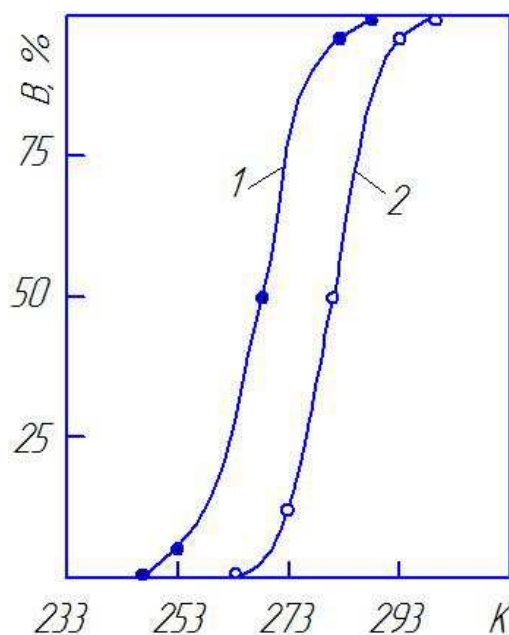
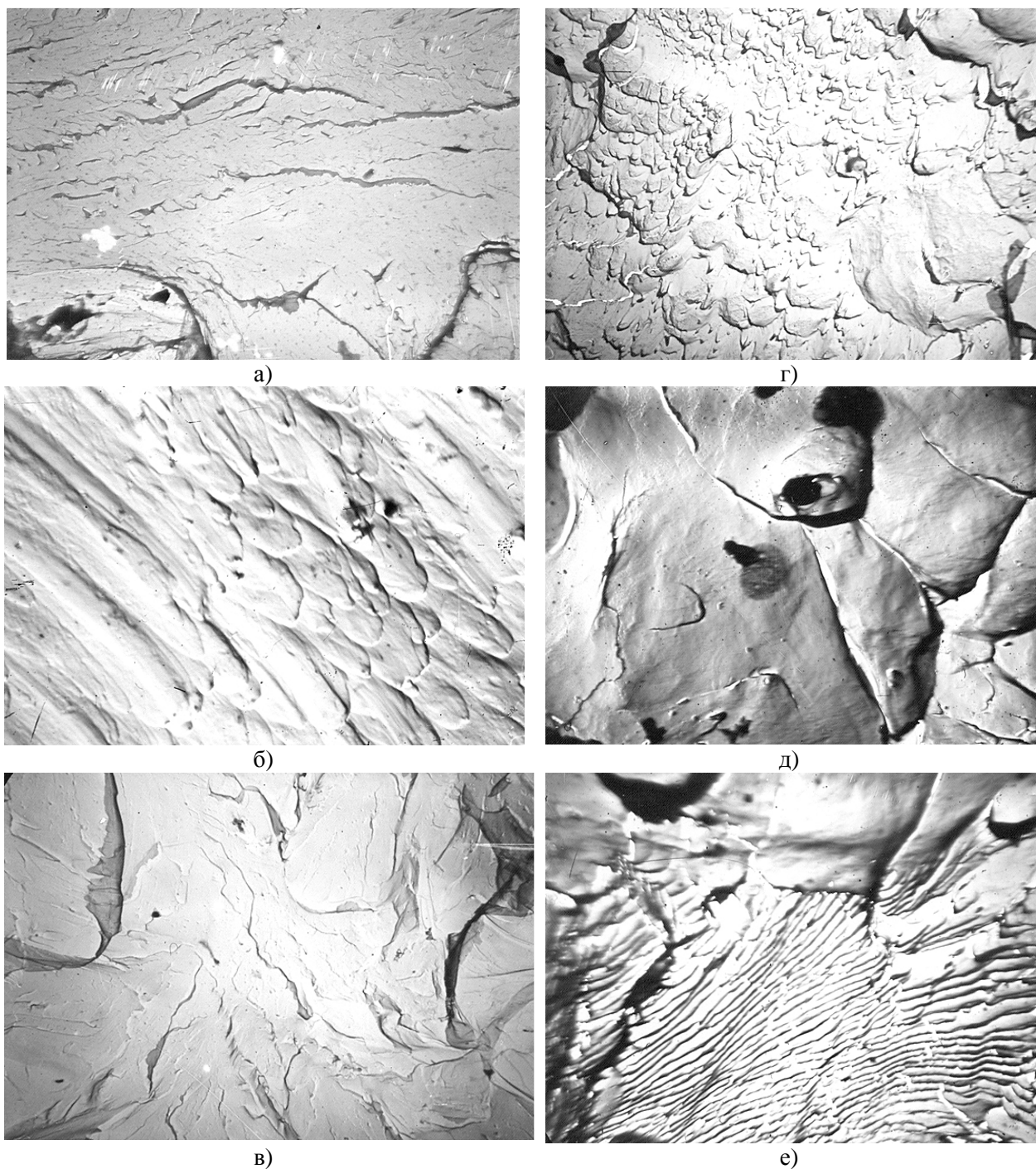


Рисунок 4 – Вплив температури випробовувань на в'язку складову в зламах не експлуатованої (1) та експлуатованої (2) сталей X52





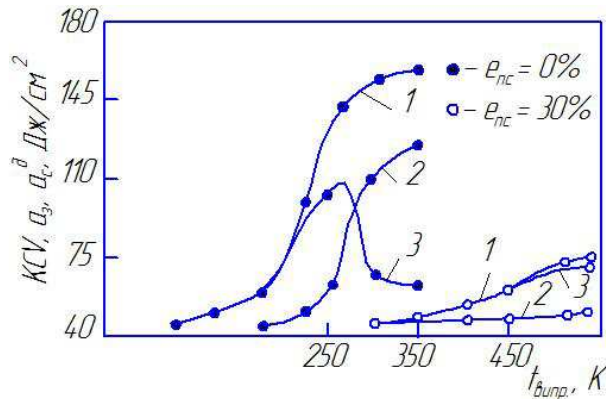
*a, б – крихке руйнування; в, г, д, е – в'язке руйнування. x 5200*  
**Рисунок 5 – Електронні фрактограми зламів ударних зразків зі сталі X52**

Ще більші зміни в характері руйнування відбулися при випробуваннях зразків, які були піддані найбільшій попередній пластичній деформації ( $e_{nc} = 30\%$ ). Величина роботи поширення тріщини стала практично рівною нулю, тому ударна в'язкість KCV визначається тільки роботою зародження тріщини  $a_3$ . В той же час робота поширення тріщини  $a_c^0$  недеформованого зразка відіграє вирішальну роль у визначенні величини ударної в'язкості KCV в області в'язких руйнувань. У механічній поведінці тривало експлуатованих сталей виявлені аномалії

можна пояснити за припущення, що деградація металу проявляється не тільки у деформаційному старінні, але й в інтенсивному розвитку пошкоджуваності (дефектності) мікро- і субмікрорівнях [5, 17].

Деформаційне старіння зміцнило і, таким чином, окрихлило метал. Це проявилось у підвищенні коефіцієнта деформаційного зміцнення та зниженні відносного звуження. Полички плинності на діаграмах розтягу є типовими для сталей з окрихленими границями зерен. Проте деформаційне старіння і розвиток пошкоджуваності діють на міцність у протилежних напрям-

ках. Тривала експлуатація трубних сталей спричинила протилежний вплив на характеристики пластичності. Деформаційне зміцнення зменшило параметри  $\psi$  і  $\delta$ , в той час як дефектність металу підвищує  $\delta$ , оскільки не тільки пластична деформація, але й розкриття дефектів є чинниками видовження зразка.



1 – KCV; 2 –  $a_c^0$ ; 3 –  $a_3$

**Рисунок 6 – Вплив температури випробувань на ударну в'язкість і її складові сталі X52**

Після 30-річної експлуатації сталь X52 показала істотне зниження величини KCV (див. табл. 4). Це зниження залежало від методу вирізання зразків із труби. Найбільш різке пониження величини ударної в'язкості було зафіксовано для зразків, вирізаних упоперек твірної труби за орієнтації надрізу 3. Цей результат практично відповідає даним рис. 2 для зразків з високою попередньою пластичною деформацією.

Однак, слід мати на увазі, що попередньо деформований метал має властивість відновлювати свої вихідні властивості [3]. Повне їх відновлення триває не менше, ніж півроку. Найбільш небезпечним є незаплановані зсувові процеси ґрунтів, які можуть створювати різні повторні навантаження. Чим довше працює трубопровід, тим не безпечнішими є такі перевантаження. Адже довготривала експлуатація сприяє деградаційним процесам металу, а раптові перевантаження можуть суттєво погіршити працездатність трубопроводу.

Тому зараз значно зросла проблема оцінювання експлуатаційної деградації металів з метою забезпечення статичної та втомної тріщиностійкості трубопроводів.

Для цього застосовують структурно-чутливі фізичні методи дослідження: внутрішнє тертя, питомий опір тощо. Однак більшість таких методів орієнтовані на оцінювання інтегральних властивостей всього об'єму металу, тоді як структурні зміни, ріст внутрішніх напружень і розвиток мікропошкодженості протікають в локальних його об'ємах, що обумовлює їх низьку чутливість.

Відомо, що електрохімічні характеристики використовуються зазвичай як показники корозійної стійкості матеріалу в різних корозійних

середовищах. Водночас вони проявляють високу чутливість до напруженого та структурного стану металів. Тому використання таких показників має велику перспективу в діагностуванні технічного стану сталевих конструкцій довготривалої експлуатації [18] і як метод неруйнівного контролю.

Потенційно для цієї мети можна використовувати такі електрохімічні показники: потенціал корозії  $E_{cor}$ , коефіцієнти Тафеля  $b_a$  і  $b_c$ , струм корозії і струм при певному анодному потенціалі  $j_{cor}$  і  $j_a$  відповідно та поляризаційний опір  $R_p$ . Ці показники представлені таким чином, що їх чутливість до експлуатаційної деградації трубних сталей зростає від першого до останнього. Оскільки електрохімічні характеристики трубних сталей по-різному чутливі до експлуатаційної деградації, то їх варто порівнювати, привівши ці характеристики до певного нормованого значення, яке б відображало відносну зміну показника за однакового ступеня деградації металу. Тоді ці нормовані значення можна використовувати як показники ступеня деградації. За такі нормовані значення прийняли відношення

$$P_D / P_O, \quad (1)$$

де  $P_D$  – величина певної характеристики деградованого матеріалу;

$P_O$  – величина цієї ж характеристики для вихідного матеріалу.

Це співвідношення використовували тоді, коли абсолютні величини цієї характеристики зменшуються з ростом ступеня деградації матеріалу (наприклад, поляризаційний опір). У випадку, коли величина характеристики збільшується із ростом ступеня деградації матеріалу, використовували обернену величину такого відношення  $(P_D / P_O)^{-1}$ : потенціал корозії, густина струму корозії, густина анодного струму за постійного потенціалу.

Проводячи електрохімічні вимірювання, потрібно враховувати, що на поверхні металу можуть утворюватися плівки, які мають бар'єрні властивості. Поверхневі плівки будуть спотворювати параметри електрохімічних вимірювань. Так, в роботі [14] оцінювання корозійної стійкості сталі X52 у модельному розчині водного конденсату не виявило суттєвих змін швидкості корозії для неексплуатованого та експлуатованого металу. Це пояснюється захисними властивостями поверхневих плівок, що утворилися з продуктів корозії. Вони формувалися в початковому періоді експозиції. Порівняльні оцінки електрохімічних параметрів у перемішувальному робочому середовищі (тобто за відсутності поверхневих плівок) засвідчили значні відмінності цих характеристик для вихідного матеріалу та після довготривалої експлуатації. Тому в даному випадку як механічні, так і корозійно-механічні показники свідчать про експлуатаційну деградацію сталі X52.

Порівняння зміни внаслідок тривалої експлуатації, з одного боку, їх механічних характеристик, а, з іншого, – електрохімічних властивостей, вказує на чітку кореляцію між ними (рис. 7).

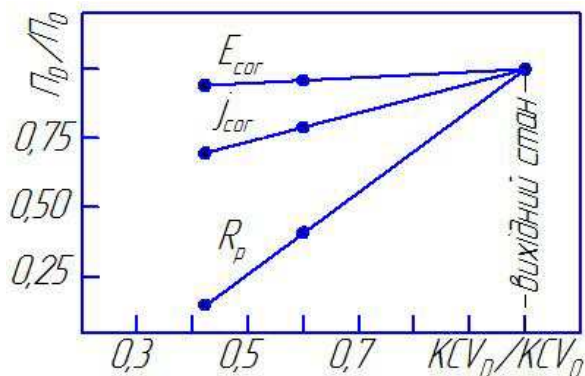


Рисунок 7 – Залежність між відносними змінами електрохімічних характеристик ( $P_D/P_0$ ) і ударної в'язкості ( $KCV_D/KCV_0$ ) експлуатованої сталі X52

Якщо оцінювати ці електрохімічні параметри на практиці, що доступно в польових умовах, то таку кореляцію можна використати для розроблення методу неруйнівного контролю стану матеріалу трубопроводу.

Оскільки електрохімічні параметри трубних сталей мають чітку кореляцію із змінами структури металів внаслідок їх деградації і, як наслідок, з їх механічними властивостями, то можна припустити, що ця кореляція буде збережена також для попередньо деформованих матеріалів.

Наші дослідження підтвердили висунуте вище припущення (рис. 8).

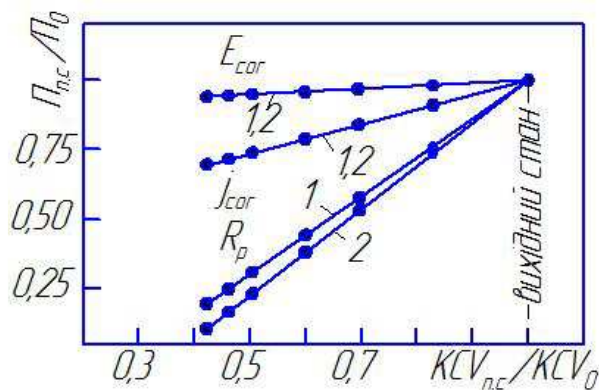


Рисунок 8 – Залежність між відносними змінами електрохімічних характеристик ( $P_{nc}/P_0$ ) і ударної в'язкості ( $KCV_{nc}/KCV_0$ ) попередньо пластично деформованої сталі X52 з труб запасу (1) і експлуатованої впродовж 30 років (2)

При виконанні рис. 8 співвідношення  $KCV_{nc}/KCV_0$  визначали за формулою (1). Однак замість величини  $KCV_D$  деградованого матеріалу підставляли значення  $KCV_{nc}$  попередньо деформованого матеріалу (рис. 2). Це ж

стосується і співвідношення  $P_{nc}/P_0$ . Залежності 1 наведені для попередньо пластично деформованої сталі X52 з труб запасу. Таке ж деформування можливе і для експлуатованих труб.

З метою вивчення цього питання ми провели деформування стисканням величиною  $e_{nc} = 30\%$  експлуатованої впродовж тридцяти років трубної сталі X52. Однак ефект від такого експерименту був незначним (залежності 2 на рис. 8). Показники  $E_{cor}$  і  $J_{cor}$  залишилися практично без змін, а найбільш чутлива електрохімічна характеристика  $R_p$  зазнала невеликого спаду. Це пов'язано з тим, що під час експлуатації метал зазнав структурних змін, які майже повністю вичерпали запас його пластичності. Відбувся певний розвиток пошкоджувальності на мікро- і субмікрорівнях. Тому додаткова пластична деформація експлуатованого металу могла тільки дещо розвинути в ньому пошкодженість.

Зазначимо також, що встановлені залежності дають можливість визначення характеристики статичної тріщиностійкості матеріалу – критичного коефіцієнта інтенсивності напружень ( $K_{IC}$ ). Для цього необхідно скористатися емпіричною формулою, представленою в роботі [7]:

$$K_{IC} = 0,1 \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV} \text{ [МПа м}^{1/2}\text{]}, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль пружності [МПа];  
 $\mu$  – коефіцієнт Пуасона;  
 $KCV$  – ударна в'язкість за Шарпі [Дж/см<sup>2</sup>].

Однак визначення  $K_{IC}$  за формулою (2) вказує на його незалежність від температур випробовувань в області чисто крихких і в'язких руйнувань, що потребує подальших досліджень.

### Висновки

Збільшення величини попередньої пластичної деформації зразків сталі X52 спричиняє спад крутизни кривих холодноломкості: зменшується перепад робіт за повністю в'язких і крихких руйнувань, розширюється інтервал температур крихко-в'язкого переходу. Робота поширення тріщини  $a_c^0$  недеформованого зразка відіграє вирішальну роль у визначенні величини ударної в'язкості  $KCV$  в області в'язких руйнувань. В той же час робота з поширення тріщини при попередній пластичній деформації  $e_{nc} = 30\%$  стала практично рівна нулю, тому ударна в'язкість  $KCV$  визначається тільки роботою зародження тріщини  $a_3$ .

Показано перспективи використання електрохімічних методів для розвитку неруйнівного методу контролю ударної в'язкості та статичної тріщиностійкості ( $K_{IC}$ ) попередньо пластично деформованих трубних сталей.



Деформування стиском  $e_{nc} = 30\%$  експлуатованої впродовж тридцяти років трубної сталі X52 практично не вплинуло на електрохімічні показники матеріалу. Це пояснюється використанням запасу пластичності та високим розвитком пошкоджуваності деградованого металу.

В подальшому планується вивчити якість оцінки величини  $K_{1C}$  за різних температур випробувань.

### Література

1 Перун І.В. Магістральні трубопроводи в горних умовах / І.В. Перун. – М.: Недра, 1987. – 175 с.

2 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. – С. 166–172.

3 Вплив попереднього пластичного деформування на механічні характеристики сталі 17Г1С-У / Є.І. Крижанівський, В.П. Рудко, О.О. Онищук, Ю.Д. Петрина // Наукові нотатки ЛДТУ. – 2003. – Вип. 13. – С. 150–159.

4 Крижанівський Є.І. Механічні характеристики пластично деформованої трубної сталі 17Г1С / Є.І. Крижанівський, Д.Ю. Петрина, О.О. Онищук // Машинознавство. – 2005. – № 6 (95). – С. 35–38.

5 Вплив локальних пластичних деформацій на фізико-механічні властивості матеріалу і напружений стан трубопроводу / Є.В. Харченко, А.О. Кичма, Р.С. Савула, Г.В. Чумало // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 2. – С. 43–51.

6 Савула Р.С. Дослідження фізико-механічних властивостей пластично деформованої трубної сталі 17Г1С після тривалої експлуатації / Р.С. Савула // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 4 (45). – С. 87–92.

7 Відомчі будівельні норми України: ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.

8 ДСТУ-НБВ.2.3.21:2008. Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68 с.

9 Романив О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей / О.Н. Романив. – М.: Металлургия, 1979. – 176 с.

10 Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: в 4-х т., под ред. В.В. Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988. – 435 с. Том 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / С.Е. Ковчик, Е.М. Морозов.

11 ГОСТ 1497-61. Металлы. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд. Стандартов, 1961. – 12 с.

12 ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах. – М.: Изд. Стандартов, 1982. – 11 с.

13 Оцінювання експлуатаційної деградації сталей магістральних нафтогазопроводів методами електрохімічних досліджень / Д.Ю. Петрина, Ю.Д. Петрина, Б.Р. Шуляр [та ін.] // Методи та прилади контролю якості. – 2012. – № 2 (29). – С. 138–145.

14 In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H.M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al // Physicochemical Mechanics of Materials. – 2008. – № 1 (44). – С. 88–99.

15 Никифорчин Г.М. Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г.М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина, М. І. Граділь // Проблеми прочності. – 2009. – № 5. – С. 66–72.

16 Гуляев А.П. Ударная вязкость и хладноломкость конструкционной стали / А.П. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1969. – 69 с.

17 Петрина Д.Ю. Експериментальна оцінка механічних властивостей сталі 17Г1С тривало експлуатованих магістральних газопроводів / Д.Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 1 (23). – С. 84–91.

18 Цирульник О.Т. Оцінювання електрохімічними методами експлуатаційної деградації низьколегованих та алюмінієвих сплавів / О.Т. Цирульник // Машинознавство. – 2008. – № 6. – С. 19–25.

Стаття надійшла до редколегії  
28.10.14

Рекомендована до друку  
професором **Грудзом В.Я.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Никифорциним Г.М.**  
(відділ корозійно-водневої деградації та захисту матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів)