

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 17Г1С ТРИВАЛОЕКСПЛУАТОВАНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Д. Ю.Петрина

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

Розглянуто проблеми, пов'язані зі зміною механічних характеристик трубної сталі 17Г1С. Показано, що пластична деформація досліджуваної сталі призводить до істотного викривлення початкової ділянки діаграми розтягу, а також зменшення модуля пружності та границі пропорційності. Вивчена деградація механічних властивостей сталі 17Г1С магістральних газопроводів після їх експлуатації 28-40 років.

Ключові слова: магістральний газопровід; трубна сталь 17Г1С; деградація; дефектність; механічні властивості

Rассмотрены проблемы, связанные со сменой механических характеристик трубной стали 17Г1С. Показано, что пластическая деформация исследуемой стали приводит к существенному искривлению начальной участка диаграммы растяжения, а также уменьшению модуля упругости и предела пропорциональности. Изучена деградация механических свойств стали 17Г1С магистральных газопроводов после их эксплуатации 28-40 лет.

Ключевые слова: магистральный газопровод; трубная сталь 17Г1С; деградация; дефектность; механические свойства

The problems with mechanical characteristic of the pipe steel 17Г1С are observed. The plastic deformation of the investigated steel lead to substantial curvature of the initial part of the extension diagram and increasing of the modulus of elasticity and threshold of proportional are shown. Degradation of the mechanical properties of gas pipeline 17Г1С steel after its service for 28-40 years has been investigated.

Keywords: main gaspipeline; pipe steel 17Г1С; degradation; defectiveness; mechanical properties

Технологічні процеси виготовлення труб, перевантаження їх при транспортуванні та укладальних роботах тощо призводять до утворення залишкової пластичної деформації сталей конструкцій. В роботах [1, 2] показано, що наклепаний матеріал змінює свої механічні властивості, а це ускладнює можливість точного прогнозування умов подальшої роботи трубопроводу. До того ж тривала експлуатація нафтогазопроводів суттєво погіршує фізико-механічні властивості сталей в об'ємі стінки труби. Тому для обґрунтування подальшої безпечної роботи трубопроводів необхідно враховувати вже не вихідні, а поточні властивості матеріалу. Останнім часом ця проблема особливо загострена стосовно магістральних нафтогазопроводів, які працюють на межі вичерпання свого розрахункового ресурсу [3, 4]. Екстремальне прикладання навантаження, зсув ґрунтів можуть викликати наклеп деградованих сталей і ще більш ускладнювати оцінку робоздатності таких трубопроводів. Таким дослідженням зараз приділяють підвищену увагу ще й тому, що деградацію властивостей часто пов'язують з деформаційним зміцненням матеріалу [4]. Загальновідомо, що експлуатація сталевих конструкцій за температур повзучості активізує процеси дифузії металу. Це призводить до розчинення цементиту та утворення легуваних карбідів по границях зерен. За звичайних температур експлуатації через низьку інтенсивність процесів дифузії мікроструктура сталей вважалася стабільною. Однак останніми дослідженнями встановлено, що на нанострук-

турному рівні такі зміни можливі. За час тривалої експлуатації магістральних трубопроводів вуглець тіла зерна на віддалі ~ 1 мкм від границі дифундує до неї, де й утворюються нанорозмірні карбідні прошарки [4]. Тому вивчення впливу наклепу матеріалу на його механічні властивості може поглибити наші знання в області деформаційного зміцнення сталей та їх деградації.

Мета роботи – вивчити вплив тривалої експлуатації магістральних газопроводів на механічні властивості трубної сталі 17Г1С.

Досліджували зразки вирізані з труб сталі 17Г1С у вихідному стані (контрольна труба у стані поставки) та після експлуатації впродовж 28-40 років. Напрямок осі зразків був перпендикулярним до твірної труби. Виділяли низ та верх експлуатованої труби. Сталь 17Г1С регламентована за хімічним складом (0,2%С; 1,3%Mn; 0,4%Si; S \leq 0,04%; P \leq 0,01%; Al \leq 0,04%) і механічними властивостями ($\sigma_{0,2} = 363$ МПа, $\sigma_B = 510$ МПа, $\delta = 20\%$, $KCV = 39,6$ Дж/см² за температури -40°C) [5].

Стандартні характеристики міцності ($\sigma_{0,2}$, σ_B) та пластичності (δ і ψ) визначали при розтягуванні циліндричних зразків діаметром робочої частини 4 мм і довжиною 25 мм за швидкості деформації $\dot{\epsilon} = 10^{-6}$ с⁻¹. Коефіцієнт деформаційного зміцнення n визначали з рівняння $\sigma - \sigma_{0,2} = \epsilon^n$, яке характеризує інтенсивність підвищення напружень на кривій розтягу

Таблиця 1 – Механічні характеристики сталі 17Г1С

Термін експлуатації, роки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	n
-	378	595	20,2	79,0	0,58
28	403	590	20,5	68,2	0,73
29	345	547	19,6	71,1	0,76
31	419	574	21,8	73,8	0,78
38	357	520	25,4	73,1	0,97
40	302	515	26,3	69,2	0,75

“істинні напруження – істинна деформація” за напружень, вищих границі плинності $\sigma_{0,2}$.

Тоді n визначається як нахил лінійної залежності $\ln(\sigma - \sigma_{0,2}) = n \cdot \ln \varepsilon$.

Істинні напруження враховують поточне зменшення перерізу зразка, пропорційне поточному значенню видовження.

Результати випробувань зразків наведені в таблиці 1.

Тривала експлуатація трубопроводів впродовж 28-40 років суттєво змінила механічні властивості матеріалів. Якщо матеріал контрольної труби володів характеристиками міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_B), дещо вищими за регламентовані, то після експлуатації спостерігалось, насамперед, різке зниження границі плинності. Її значення для експлуатованих 29, 38 і 40 років сталей є нижчими за регламентоване (363 МПа), що потребує прийняття рішення щодо доцільності подальшої експлуатації трубопроводу. Зазнала зниження також границя міцності, проте навіть після 40 років експлуатації вона не виходить за межі регламентованого значення 510 МПа.

В таблиці 1 наведено механічні характеристики нижніх фрагментів труб. Верхні фрагменти мали характеристики міцності вищі на 1...4 МПа, що вказує на незначну різницю між ними.

Виявлено аномалію у механічній поведінці тривало експлуатованих сталей, що проявилася у різному характері зміни характеристик пластичності (зменшені ψ та рості δ). Це пояснюється тим, що деградація матеріалу проявляється не тільки у деформаційному старінні, але й в інтенсивному розвитку дефектності на мікрота субмікрорівнях. Нами було показано, що параметр δ деградованої сталі відображає не тільки її пластичну деформацію, але й розкриття зароджених під час експлуатації великої кількості мікротріщин [6]. Тому зміну пластичності тривало експлуатованих сталей можна оцінювати тільки за параметром ψ , який, до речі, в документі [5] відсутній.

З ростом часу експлуатації труб чітко зафіксовано різке збільшення коефіцієнта деформаційного зміцнення сталі n.

Для оцінки чутливості різних параметрів матеріалу труб до експлуатаційної деградації введемо показник відносних змін Δ , що стосується механічних характеристик тривало експлуатованої сталі 17Г1С, віднесені до їх початкового значення (рис. 1). За спадом міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_B) важко судити про деградацію сталі за перші 30 років експлуатації. За наступні 10 років вони змінюються відчутніше. Таку ж тенденцію має і параметр δ , однак, у бік збільшення. Очевидно, в цей час відбувається найбільш інтенсивний розвиток дефектності сталі. Водночас показники n і ψ змінюються більше за перші 30 років експлуатації (перший – у бік збільшення, другий – зменшення).

В інженерній практиці оцінку зміни механічних характеристик матеріалу проводять за традиційними методами з введенням додаткових коефіцієнтів запасу. Для пластичних матеріалів за граничне напруження приймають границю плинності матеріалу, оскільки це виключає появу залишкових деформацій в конструкції. Таким чином, матимемо

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{k_T},$$

де: σ_T – границя плинності матеріалу (фізична або умовна);

k_T – коефіцієнт запасу відносно границі плинності, який приймають зазвичай 1,2...2,5.

Зараз існує тенденція підраховувати коефіцієнт запасу як добуток окремих коефіцієнтів $k_T = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \dots$, кожний з яких диференційовано враховує вплив різних факторів на міцність конструкції. Очевидно, що один із них повинен враховувати зниження руйнівних напружень від часу експлуатації. В нашому випадку аналіз результатів досліджень свідчить, що величина такого коефіцієнта для матеріалу труби після сорокарічної експлуатації становить 1,25.

Тривала експлуатація трубопроводів змінила також характер діаграм розтягу $\sigma - \varepsilon$: на ній з'явилася ділянка плинності (рис. 2). Ця ділянка особливо чітко виражена для сталі, яка експлуатувалась впродовж 40 років (крива 3 на рис. 2). Тому для подальших випробувань використовуємо цю сталь.

Початкові ділянки діаграм ненаклепаних матеріалів зображено пунктирними лініями 1, 2, 3. Зазначимо, що крім появи сходинки плинності початкові ділянки діаграм розтягу тривало експлуатованих сталей отримували певне викривлення, що мало місце при випро-

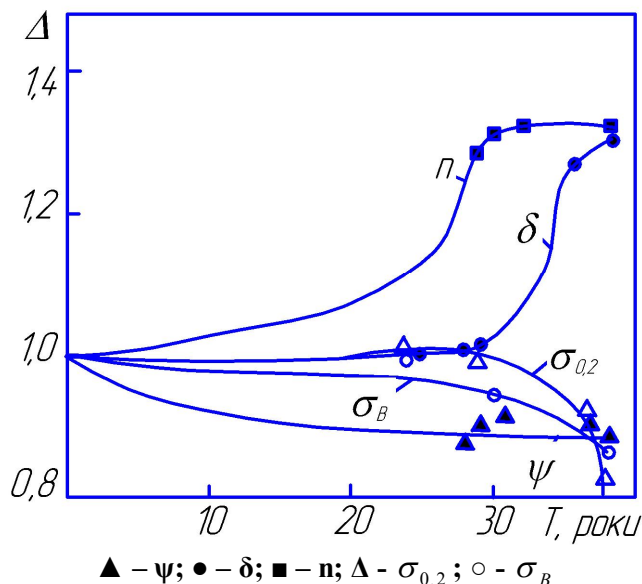


Рисунок 1 – Залежність показника відносної зміни механічних характеристик сталі 17Г1С від часу експлуатації трубопроводів

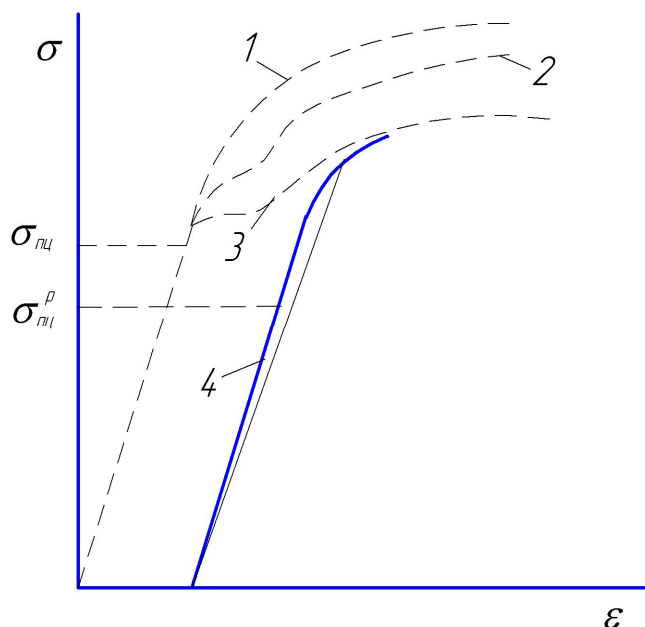


Рисунок 2 – Характерні діаграми розтягу сталі 17Г1С контрольної труби (1) та після експлуатації 29 (2), 40(3) років і 40 років після наклепу (4)

буваннях наклепаного матеріалу [1]. У зв'язку з цим січний модуль зменшився на ~3,5%. Цей факт наглядно свідчить про деформаційне старіння сталі 17Г1С у ході її довготривалої експлуатації.

Початкова ділянка діаграми наклепаного після 40 років експлуатації матеріалу, мала ще більш істотне викривлення (крива 4 на рис. 2).

Подальше вивчення впливу наклепу на механічні характеристики деградованої сталі 17Г1С проводили за методикою, прийнятою в роботі [1]. Результати механічних випробувань зображено на рис. 3. Залежності січного модуля деградованої сталі 17Г1С від величини попередньої пластичної деформації ϵ_{np} за різних зна-

чень відносного видовження ϵ_p стають більш пологими порівняно з аналогічними випробуваннями сталі 17Г1С контрольної труби [1]. Це ж спостерігається і для залежностей, представлених на рисунках 4 і 5. Якщо наклеп розтягом зразків контрольних труб до $\epsilon_{np} \approx 5\%$ призводив до зменшення модуля пружності на 5...7% порівняно з вихідною величиною, то наклеп зразків деградованих труб до $\epsilon_{np} \approx 3\%$ зменшував модуль пружності лише на 2...4%. Однак нагадаємо, що величина E для ненаклепаного деградованого матеріалу була на ~3,5% нижча за матеріал контрольних труб. Подальший ріст ϵ_{np} практично не впливав на величину модуля.

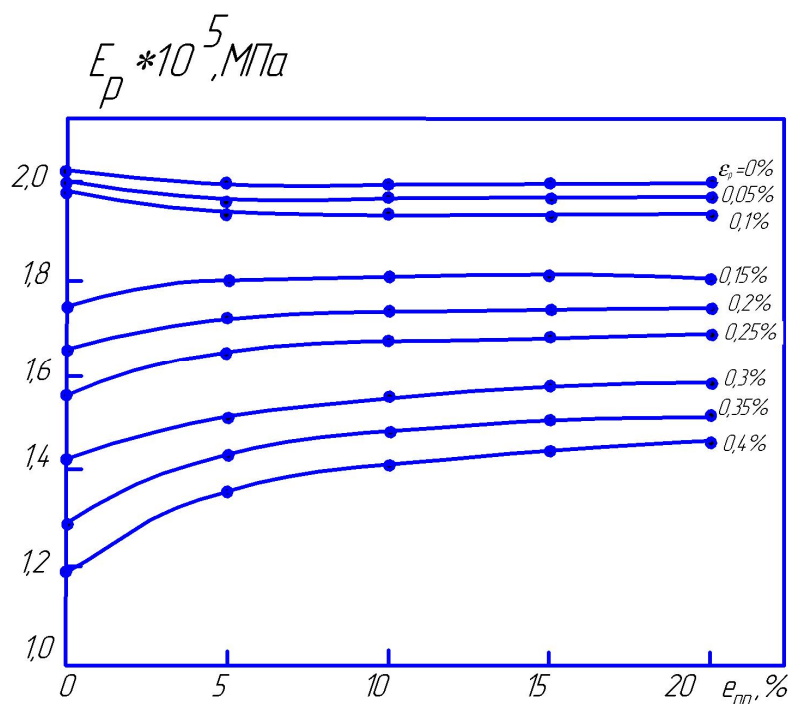


Рисунок 3 – Залежність січного модуля деградованої сталі 17Г1С від величини поперечної пластичної деформації $\epsilon_{пр}$ за різних значень відносного видовження ϵ_r

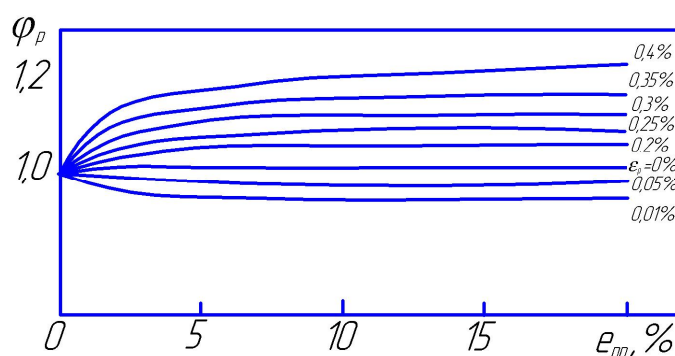


Рисунок 4. – залежність відносної зміни модуля деградованої сталі 17Г1С від величини поперечної пластичної деформації $\epsilon_{пр}$ за різних значень відносного видовження ϵ_r

Параметр ϵ_r^o зсувається порівняно з випробуваннями зразків контрольних труб вправо, розширюючи при цьому зону «розміщення» та звужуючи зону «зміцнення».

Істотне викривлення початкової ділянки діаграми розтягу наклепаної деградованої сталі 17Г1С вказує на зміни як границі плинності, так і границі пропорційності. Залежності $\sigma_{нц}^p$ і σ_T^p від величини наклепу розтягом надані на рис. 6. На відміну від матеріалу контрольних труб зниження $\sigma_{нц}^p$ ще істотніше і сягає майже 50% від вихідного значення за $\epsilon_{пр} \approx 10\%$. Подальше зростання $\epsilon_{пр}$ не впливає більше на величину $\sigma_{нц}^p$. Щодо характеристики σ_T^p , то з ростом $\epsilon_{пр}$ до 10% вона монотонно зростає, а відтак залишається постійною. Спаду σ_T^p за низь-

ких значень $\epsilon_{пр}$ (до 0,5%), який мав місце при випробуваннях зразків контрольних труб [1], для деградованого матеріалу не зафіксовано. Це також є свідченням деформаційного старіння матеріалу у ході його експлуатації.

Експериментально встановлено, що модуль пружності E за час експлуатації сталі монотонно зменшується (рис. 7, а). Однак цей спад незначний і становить на сороковий рік близько 3,5%. Коефіцієнт поперечної деформації також має тенденцію до спаду (рис. 8, а), однак його характер більш складний: він має два ступені. Щоб пояснити цей феномен нагадаємо, що коефіцієнт поперечної деформації являє собою абсолютну величину відношення поперечного звуження до поздовжнього видовження при розтягу зразка

$$\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right|.$$

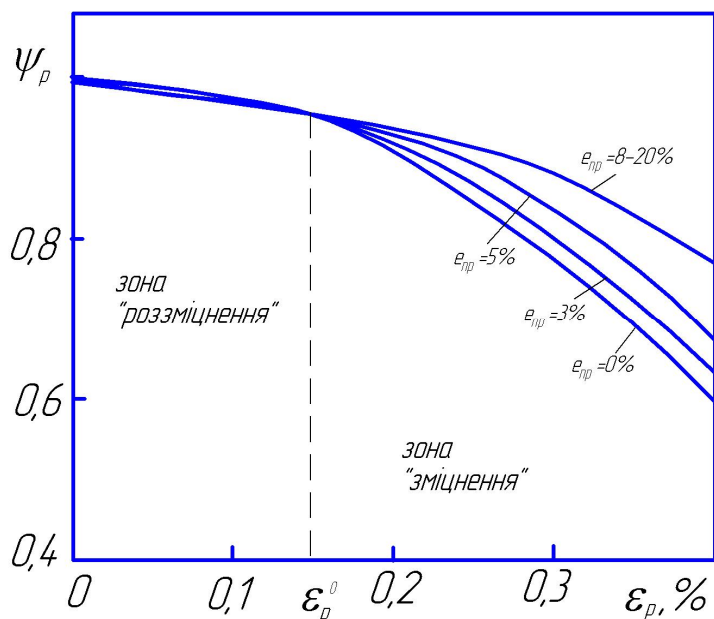


Рисунок 5 – Залежність відносної зміни січного модуля деградованої сталі 17Г1С від величини відносного видовження ε_p за різних значень попередньої пластичної деформації ε_{np}

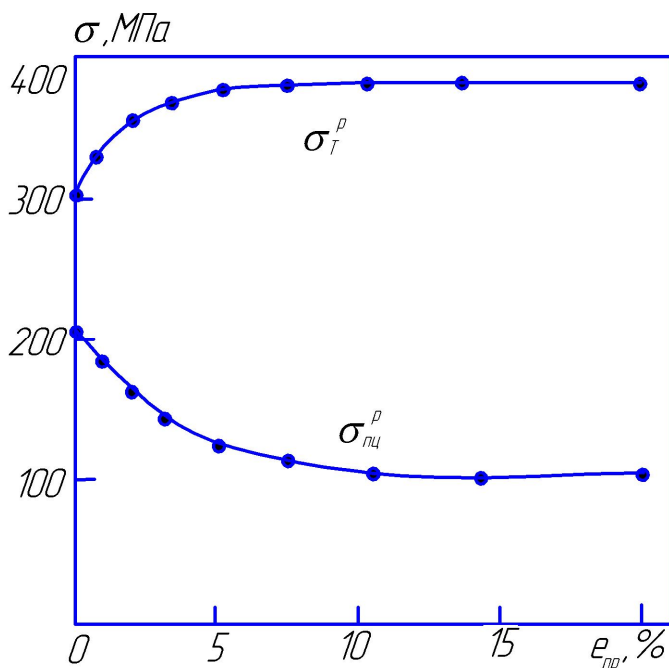


Рисунок 6 – Залежності $\sigma_{пц}$ та σ_T^p деградованої сталі 17Г1С від величини наклепу розтягом

Очевидно, що перший ступінь спаду μ пов'язаний зі зменшенням параметра ψ в перші роки експлуатації трубопроводу (табл. 1, рис. 1). Після 38...40 років спостерігається інтенсивний розвиток дефектності матеріалу труби, що проявляється в аномальному зростанні δ (таблиця 1, рис. 1) і, як наслідок, в появі другого ступеня спаду параметра μ .

Оцінку чутливості E і μ до експлуатаційної деградації проведемо за прийнятим раніше показником відносних змін Δ (рис. 7, б). Аналіз наведених результатів досліджень свід-

чить, що за змінами величини модуля пружності E практично неможливо оцінити схильність сталі 17Г1С до експлуатаційної деградації. В той же час коефіцієнт поперечної деформації μ має чітко виражену тенденцію до пропорційного зниження впродовж всього часу експлуатації трубопроводу.

Оскільки деградація сталей призводить до спаду параметрів ψ і σ_B , то слід чекати також зменшення границі витривалості. Адже вона за даними роботи [7] змінюється пропорційно критерію Дакворса $\sigma_B \cdot \psi$. Для з'ясування цього

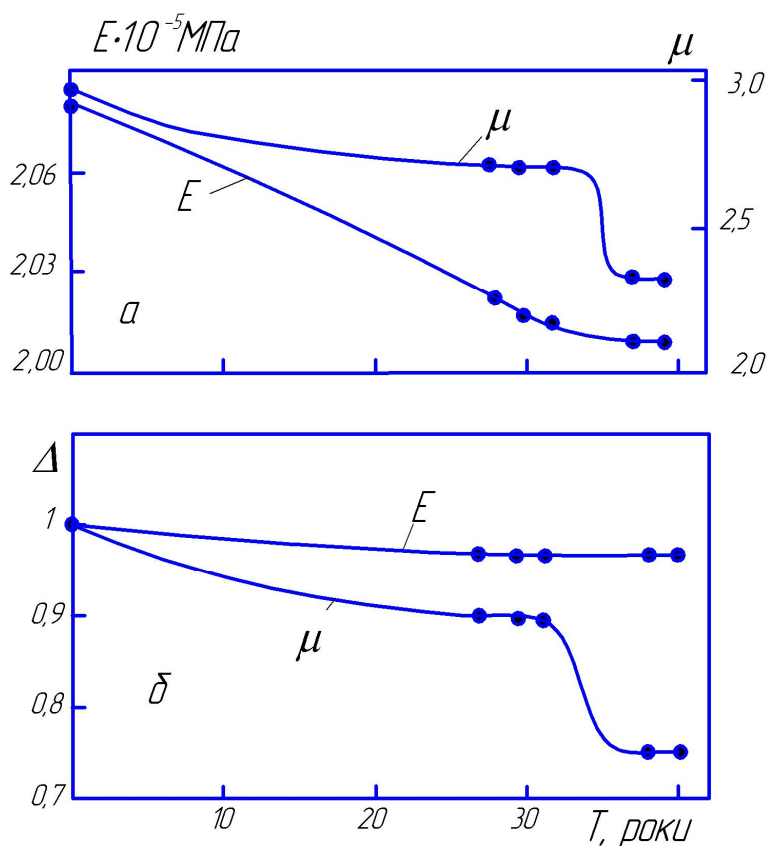
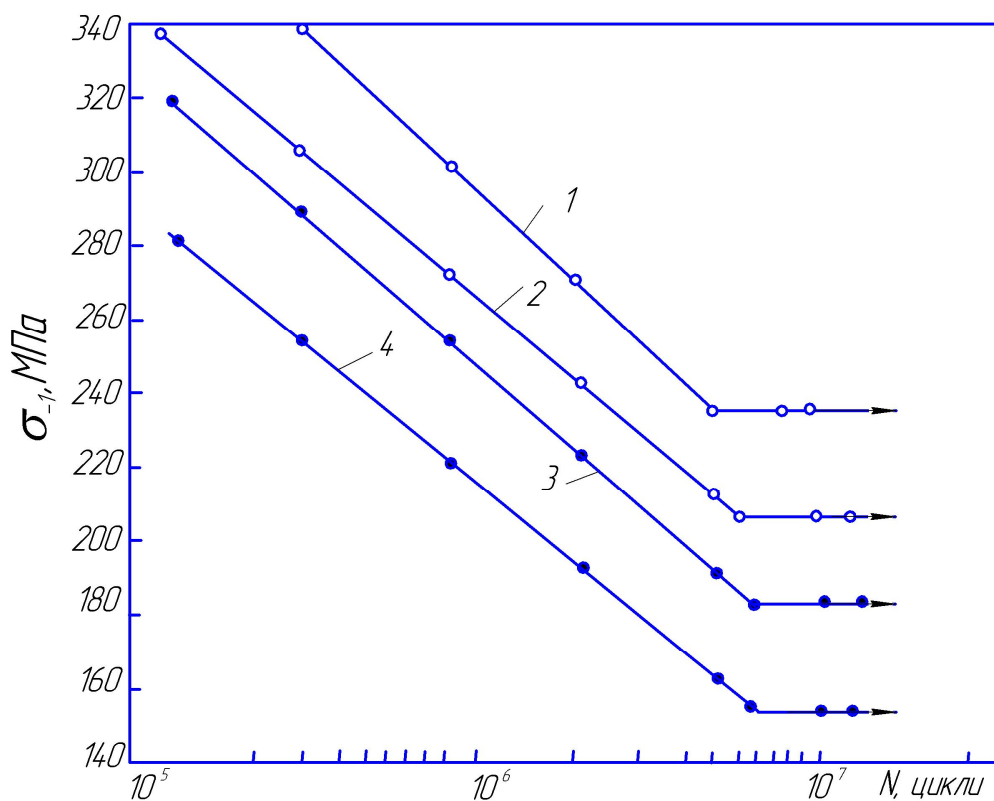


Рисунок 7 – Динаміка зміни модуля пружності E та коефіцієнта поперечної деформації μ за час експлуатації сталі 17Г1С

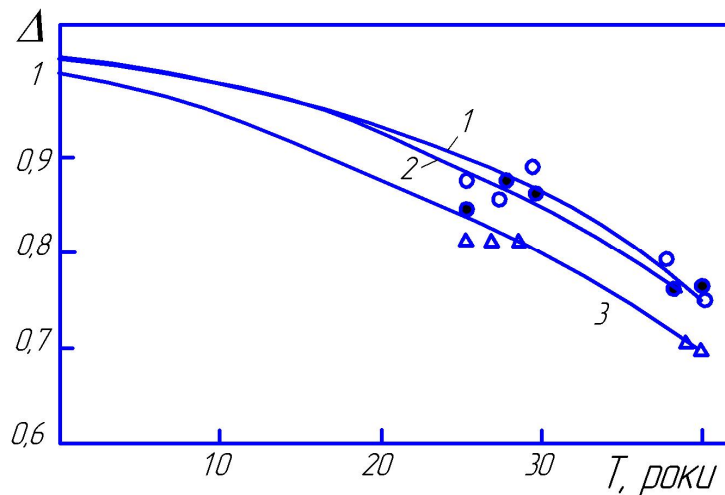


○ – з контрольних труб; ● – з експлуатованих труб впродовж 40 років;
1,3 – циліндричні гладкі; 2,4 – з концентратором

Рисунок 8 – Криві втоми зразків сталі 17Г1С

Таблиця 2 – Залежність показників витривалості сталі 17Г1С від часу експлуатації трубопроводу

Термін експлуатації, роки	-	28	29	31	38	40
Критерій Дакворса, $\sigma_B \cdot \psi$	47005	40238	38892	42361	38012	35638
σ_{-1}	238	200	208	205	181	183
σ_{-1}^H	209	172	170	169	150	147



1 - $\sigma_B \cdot \psi$; 2 - σ_{-1} ; 3 - σ_{-1}^H

Рисунок 9 – Динаміка відносних змін показників витривалості сталі 17Г1С за час експлуатації трубопроводу

питання проводились втомні випробовування зразків сталі 17Г1С, вирізаних як з контрольних, так і експлуатованих труб. Частоту навантаження прийняли 0,3 Гц, оскільки вона найбільш повно відповідала коливанням напружень трубопроводів за нерівномірного газоспоживання. Використовували зразки двох типів: гладкі циліндричні та з концентратором. Останні дали можливість оцінити чутливість границі витривалості деградованої сталі до надрізів і пошкоджень поверхонь.

Експериментальні дані з визначення границь витривалості гладких циліндричних зразків (σ_{-1}) і зразків з концентратором (σ_{-1}^H), а також обчислені за даними таблиці 1 величини критерію Дакворса представлені в таблиці 2.

На рис. 8 побудовані криві втомні зразків з контрольних і експлуатованих впродовж 40 років труб, з характеру яких чітко проглядається деградація втомних характеристик матеріалу труби. Оцінку чутливості показників витривалості сталі 17Г1С до деградації проводимо за їх відносними змінами (рис. 9).

Відомо, що чим більш високу міцність має сталь, тим вона чутливіша до надрізів і пошкоджень поверхні. Оскільки під час експлуатації міцність сталі спадає, то слід очікувати пониження чутливості зразків до надрізів. Однак випробування зразків з концентратором показали зворотнє явище: спад границі витривалості

був найбільшим (крива 4 на рис. 8). Тому чутливість показника σ_{-1}^H до деградації сталі – найвища (крива 3 на рис. 9). Цей факт пояснюється тим, що зміна міцності сталі відіграє тут другорядну роль, а першочерговий вплив на спад границі витривалості зразків з концентратором має зростання дефектності матеріалу.

Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про повну кореляцію між критерієм Дакворса та границею витривалості сталі 17Г1С. Це бачимо з даних, представлених на рис. 9. Відносні зміни показників $\sigma_B \cdot \psi$ (крива 1) і границі витривалості σ_{-1} (крива 2) практично повністю збігаються за весь час експлуатації трубопроводів. Це вказує на те, що за зміною критерія Дакворса можна оцінити спад границі витривалості деградованої сталі. Оскільки критерій Дакворса визначається за параметрами σ_B і ψ , які одержують при випробуваннях на розтяг, то оцінку величини границі витривалості можна виконати не проводячи дорогі та довготривалі дослідження на втому.

Висновки

Тривала експлуатація магістрального газопроводу спричиняє деградацію механічних властивостей сталі 17Г1С. Вона проявляється в

Література

одночасному зниженні, з одного боку, модуля пружності, коефіцієнта поперечної деформації, міцності, границь витривалості при випробуваннях гладких циліндричних зразків і зразків з надрізом та зростанні, з іншого боку, коефіцієнта деформаційного зміцнення.

Виявлено аномалію у механічній поведінці тривало експлуатованих сталей, що проявилася у різному характері зміни характеристик пластичності (зменшенні ψ та рості δ). У зв'язку з цим показано, що параметр δ деградованої сталі відображає не тільки її пластичну деформацію, але й розкриття зароджених під час експлуатації великої кількості мікротріщин.

За спадом модуля пружності E важко судити про деградацію сталі впродовж всього часу експлуатації, оскільки він відбувається дуже монотонно, і за 40 років становить тільки 3,5%. Це ж стосується і параметрів міцності $\sigma_{0,2}$ і σ_B в перші 30 років експлуатації, в наступні 10 років вони змінюються відчутніше. Таку ж тенденцію має і параметр δ , однак у бік збільшення. Коефіцієнт поперечної деформації μ зменшується пропорційно зі звуженням та видовженням за весь час експлуатації. Так само спостерігається і зменшення границь витривалості σ_{-1} і σ_{-1}^H , проте він відбувається пропорційно зменшенню σ_B і ψ . Запропонований метод оцінки границі витривалості σ_{-1} деградованої сталі за результатами статичних випробувань на розтяг (за критерієм Дакворса).

Ознакою експлуатаційної деградації сталей є також поява на кривій розтягу полицки плинності.

Найбільш чутливими механічними характеристиками сталі 17Г1С до її деградації є коефіцієнт деформаційного зміцнення n , коефіцієнт поперечної деформації μ і границя витривалості зразків з надрізом σ_{-1}^H .

Встановлено, що деградація сталі проявляється у деформаційному старінні та інтенсивному розвитку дефектності на мікро- і субмікрорівнях.

1 Петрина Д. Вплив наклепу розтягом на механічні характеристики трубних сталей 17Г1С та 20 / Д.Петрина // Машинознавство. – 2008. – № 4. – С. 30-33.

2 Петрина Д.Ю. Вплив експлуатаційних навантажень на механічні властивості сталей трубопроводів / Д.Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2009. – № 2. – С. 97-107.

3 Krasowskiy A.Y. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation / A.Y. Krasowskiy, A.A. Dolgiy, V.M. Topor // Proc. "Charpy Centary Conference", Poitiers. – 2001. – 1. – P. 489-495.

4 Нечаев Ю.С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов / Ю.С. Нечаев // Успехи физических наук. – 2008. – 7, № 178. – С. 709-726.

5 Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. Відомчі будівельні норми України. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 56 с.

6 In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G.Gabetta, H.M.Nykyforchyn, K.Nikiforov, M.I.Hredil, D.Yu.Petryna, T.Vuherer // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – № 1. – С. 88-99.

7 Duckworth W.E. The achievement of high fatigue strength in steel / W.E.Duckworth // Metallurgia. – 1964. – № 412. – P. 53-55.

*Стаття поступила в редакційну колегію
26.01.10*

*Рекомендована до друку професором
Є.І.Крижанівським*