

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

В.Д. Миндюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506611,
e-mail: tinlaven@gmail.com

Експлуатація магістральних трубопроводів супроводжується впливом значної кількості чинників, які призводять до деформаційного старіння сталей, що проявляється тільки за умов довготривалої експлуатації (понад 20 років). Аналіз робіт з досліджень властивостей трубних сталей у вихідному стані і після визначеного терміну експлуатації засвідчив, що показники міцності зростають, а в'язко-пластичні показники знижуються порівняно зі своїми номінальними значеннями. Однак існуючі методи досліджень зміни механічних характеристик сталей часто не враховують процеси незворотних змін мікроструктури. Тому є необхідність у встановленні і вивченні ознак виражених мікроструктурних змін металу труб та встановленні зв'язку між ними та зміною механічних властивостей металу. Для вирішення даної проблеми було виконано комплекс досліджень фізико-механічних характеристик зразків сталі 17ГІС, що були вирізані з експлуатованого трубопроводу, а також труб аварійного запасу. Вивченню піддавались твердість металу в перерізі по товщині стінки, ударна в'язкість, коерцитивна сила, мікротвердість, а також макро- і мікроструктура трубної сталі. Зіставлення отриманих даних для металу експлуатованих труб і труб аварійного запасу з відповідними їм сертифікатними значеннями вказало на присутність ознак старіння металу труб, що проявляється в деградації основних механічних характеристик, зумовлених деформаційним старінням та перебудовою фазових складових мікроструктури.

Ключові слова: деградація, мікроструктура, міцність, пластичність, мікротвердість, коерцитивна сила, деформаційна зона.

Експлуатація магістральних трубопроводов сопровождается влиянием большого количества факторов, вызывающих деформационное старение сталей, что проявляется только при длительной эксплуатации (свыше 20 лет). Анализ работ по исследованию свойств трубных сталей в исходном состоянии и после определенного срока эксплуатации показал, что показатели прочности увеличиваются, а вязко-пластические свойства уменьшаются по сравнению со своими номинальными значениями. Но существующие методы исследований изменения механических свойств сталей часто не учитывают процессов необратимых изменений микроструктуры. Поэтому необходимо установить и изучить признаки выраженных микроструктурных изменений металла труб и установить связь между ними и изменением механических свойств металла. Для решения данной проблемы был выполнен комплекс исследований физико-механических свойств образцов стали 17ГІС, вырезанных из эксплуатируемого трубопровода, а также труб аварийного запаса. Изучению поддавались твердость металла в сечении по толщине стенки, ударная вязкость, коерцитивная сила, микротвердость, а также макро- и микроструктура трубной стали. Сопоставление полученных данных для металла эксплуатируемых труб и труб аварийного запаса с соответствующими им сертификатными значениями указало на присутствие признаков старения металла труб, которое проявляется в деградации основных механических свойств, предопределенных деформационным старением и перестройкой фазовых составляющих микроструктуры.

Ключевые слова: деградация, микроструктура, прочность, пластичность, микротвердость, коерцитивная сила, деформационная зона.

The operation of the main pipelines is influenced by a number of factors, causing the steel strain ageing that shows up only in case of its long-term operation (over 20 years). The analysis of studies on the pipe steels features in the initial state and after a certain period of operation showed the presence of the steel mechanical properties changes, which are expressed in the strength increase and reduction of the viscous and plastic properties in comparison with their nominal values. But the valid methods for research of the steels mechanical properties changes are often valid for only one brand or type of material, and ignore the irreversible changes processes in the microstructure. Therefore, to determine and study the obvious signs of microstructural changes in the pipe metal and determine their relationship with the changes of the metal mechanical changes. The research complex of physical and mechanical properties of the pipe steel samples was carried out to solve this problem. The samples were cut out from the operated pipeline and also from the emergency stock pipes. The metal wall thickness cross-sectional hardness, toughness, coercive force, microhardness, macro- and microstructure of the pipe steel were studied. Comparison of the operated pipe metal data and the emergency stock pipe metal data with the corresponding certificate values indicated the presence of pipe metal ageing signs, which is manifested in the main mechanical properties degradation predefined by the deformation ageing and the microstructure phase components restructuring.

Keywords: degradation, microstructure, strength, plasticity, microhardness, coercive force, deformation zone.

Вступ

В міру збільшення терміну експлуатації металевих конструкцій відбувається деградація деяких важливих властивостей матеріалів. Су-

часна складна економічна ситуація в Україні зумовлює необхідність продовження терміну експлуатації металоконструкцій високоризикових діючих об'єктів (наприклад, енергетика,

трубопровідний транспорт, нафтогазохімія і ін.), що відпрацювали свій проектний термін. Однак у діючих нормативно-технічних документах при розрахунку залишкового ресурсу устаткування не враховується рівень деградації матеріалів і конструкцій в процесі експлуатації, що істотно знижує достовірність прогнозу їх ресурсу. А тому подальша безпечна експлуатація устаткування та металоконструкцій можлива тільки на основі отримання і аналізу об'єктивних інструментальних даних про фактичний стан матеріалів.

Слід зазначити, що в міру збільшення терміну експлуатації металевих конструкцій відбувається деградація деяких важливих властивостей металів. Структурні і фазові перетворення, що відбуваються в металах і сплавах при виготовленні і експлуатації, приводять до зміни їх фізичних і механічних властивостей.

Деградаційні процеси найбільш характерні для металів конструкцій довготривалої експлуатації під дією чинників, що прискорюють ці процеси: високі питомі тиски, знакозмінні навантаження, корозійне агресивне середовище, високі робочі температури і термоциклічні процеси теплонавантаження і т.п.

В процесі деформації пластичних металевих матеріалів спостерігається поступове накопичення і взаємодія дефектів кристалічної ґратки (вакансій, міжвузлових атомів, дислокацій і дисклінацій, двійників, границь блоків і зерен і т. п.): спочатку зароджуються субмікروتріщини, що потім розширюють мікروتріщини, які, досягнувши критичного розміру, призводять до незворотної пошкодженості матеріалу та руйнування конструкції.

Для різного типу конструкцій і матеріалів, з яких вони виготовлені, процеси деградації і зміни структури металу відбуваються по-різному. Це пояснюється особливостями експлуатації і чинниками, що діють на них.

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

В ході експлуатації на магістральні трубопроводи діє значна кількість чинників, що впливають на фізико-механічні характеристики. Сукупний вплив різних чинників може призводити до такого явища, як деформаційне старіння сталей конструкцій, яке проявляється тільки за умов довготривалої експлуатації (понад 20 років). Першим проявом старіння металу є те, що метал стає більш крихким, знижується запас пластичності. До деформаційного старіння більш схильні нафтогазопроводи [1], більшість з яких побудовані ще до 70-х рр. 20 ст., і нормативний термін експлуатування яких вже закінчився або підходить до завершення.

Найбільш небезпечними, з точки зору експлуатаційної міцності та надійності металоконструкцій, є поява пластичних незворотних деформацій. Таке можливо тільки за умов досягнення у локальному об'ємі металу напружень, що перевищують критичне значення границі плинності [2].

Таким чином, процес деформаційного старіння маловуглецевих та низьколегованих сталей (використовуються як матеріал нафтогазопроводів) поєднує основні механізми структурних перетворень [3]: накопичення незворотних мікропластичних напружень (рух дислокацій), перерозподіл атомів вуглецю, азоту та інших елементів, взаємодія домішкових атомів зі дислокаціями, розпад цементиту, що знайшло підтвердження в роботі [4] та утворення нових карбідних частинок, утворення мікротріщин при накопиченні однойменних дислокацій біля різних перешкод (меж зерен, субзерен, домішkových атомів, вакансій).

Як свідчить досвід, більшість металоконструкцій вітчизняної промисловості, що експлуатуються тривалий час у складних умовах, перебувають на стадії старіння, що підвищує кількість відмов та аварій.

У ході тривалої експлуатації металоконструкцій зміна механічних характеристик сталей проявляється зміною показників міцності (збільшуються здебільшого на 10-15%) та зниженням в'язко-пластичних показників (на 5-7%) і показників опору крихкому руйнуванню (на 15-20%) порівняно зі своїми номінальними значеннями (рисунком 1).

Вказані характеристики нормуються у вітчизняних та іноземних (згідно з вимогами стандартів серії *ASTM*) стандартах на сталі.

Детальним вивченням робіт щодо досліджень структури трубних сталей у вихідному стані і після визначеного терміну експлуатації зафіксовано, що в нормальній ферито-перлітній структурі вуглецевих сталей перліт має пластичну або зернисту будову. В сильно деградованій структурі спостерігається розпад перліту, його сфероїдизація, карбідна складова перліту зміщується до границь зерен. Відбувається коагуляція карбідів, збільшується товщина границь зерен і кінцева структура є поєднанням фериту з карбідною сіткою.

Процеси «старіння» структури в нормалізованих сталях протікають і без навантаження. При цьому дещо підвищуються міцнісні властивості (особливо границя плинності) і знижуються характеристики пластичності. Під навантаженням (статичним або циклічним) процеси динамічного деформаційного старіння інтенсифікуються [5]. Оскільки процеси руху і розмноження дислокацій в локальних об'ємах металу протікають за напружень, значно менших статичної границі плинності, то і процеси деформаційного старіння в трубних сталях протікають при експлуатаційних навантаженнях. Металографічні дослідження і вимірювання твердості низьковуглецевих сталей свідчать, що в структурі деградованих низьковуглецевих сталей спостерігається розпад перліту і коагуляція карбідів, а зміна величини твердості при цьому залежить від деструктивних процесів у структурі сталі.

У ряді робіт інших авторів зроблені аналогічні висновки про зміну механічних властивостей трубних сталей після тривалої експлуатації. Проведені дослідження показали [6], що в

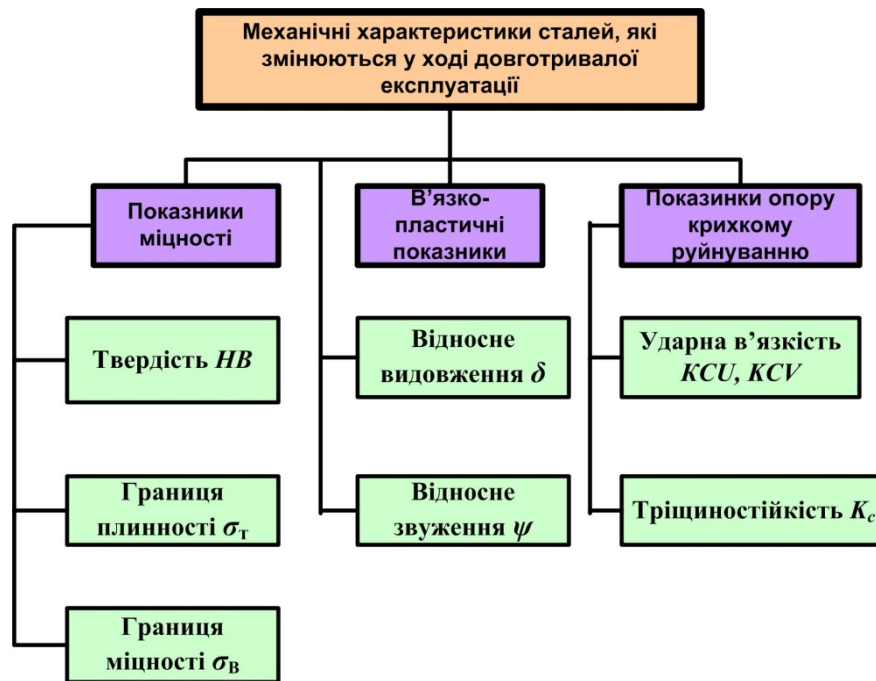


Рисунок 1 - Механічні характеристики сталей, зазнають змін у ході довготривалої експлуатації металоконструкцій

той час як міцнісні характеристики металу труб (межа міцності і межа плинності) газо- і нафтопроводів залежно від часу експлуатації протягом 25 років мало змінюються (лише трохи підвищується рівень межі міцності), спостерігається значне зниження відносного видовження і звуження. Ударна в'язкість KCV залежно від часу експлуатації трубопроводів також різко знижується, особливо після досягнення 10 - 12 літнього терміну експлуатації.

Встановлено, що тривала експлуатація дослідженого основного металу труб газопроводів супроводжується різким його окрихленням, що проявляється при динамічних випробуваннях. Окрихлення супроводжується зміною мікромеханізму руйнування – з в'язкого транскристалітного (шляхом зародження, зростання об'єднання мікропор) на крихке. При цьому основним механізмом крихкого руйнування є транскристалітний. Аналіз причин руйнування металу трубопроводів показав, що в процесі експлуатації труб в металі відбуваються істотні зміни структури і властивостей, пов'язані, в основному, з розвитком малоциклової втоми і деформаційного старіння. Останнє обумовлене наявністю в металі домішок вуглецю і азоту, які взаємодіють з дислокаційною структурою, сприяючи окрихленню сталей, оскільки при цьому зменшується можливість релаксації пружного напруження за рахунок пластичної деформації. Дослідження металу труб, що перебували в експлуатації до 30 років, показали, що деформаційне старіння не супроводжується значною зміною міцнісних властивостей, таких, як межа міцності і плинності, проте воно призводить до різкого зниження ударної в'язкості, особливо при мінусових температурах [6].

У роботі [7] також вивчали вплив терміну експлуатації магістрального нафтопроводу, виготовленого із сталі 17ГС, на зміну механічних властивостей в порівнянні з початковим станом. За початковий стан приймали метал поточного виробництва Орсько-Халиловського металургійного комбінату і труби аварійного запасу. Стандартні механічні властивості - тимчасовий опір руйнуванню σ_0 , умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$, відносне видовження δ і відносне звуження ψ практично не змінюються залежно від тривалості експлуатації в межах розкиду експериментальні дані близькі до норми.

Проте встановлено зниження ударної в'язкості при випробуванні металу труб після 20 – 25 років експлуатації величина KCV при +20 °C (KCV+20) знизилася з 55–70 до 30–50 Дж/см². Випробування на удар в інтервалі температур від – 40 до +20 °C показали, що із збільшенням терміну експлуатації відбувається поступове зміщення критичної температури переходу металу труб в крихкий стан T_{50} у бік вищих температур.

Після 25 – 35 років експлуатації труб температурний поріг холодноламкості переходить в ділянку плюсових температур. Досягши терміну експлуатації труб (близько 25 років), відбувається різке зниження усіх величин, що характеризують опір металу труб руйнуванню при статичних випробуваннях на згин зразків. Пластичність зменшується приблизно в 1,5 рази. Майже в 2 рази після 25 років експлуатації знижується величина сумарної роботи руйнування металу труб, причому в основному за рахунок зменшення роботи зародження тріщини. Робота поширення тріщини зменшується у меншій мірі. Дослідження закономірностей уповільненого руйнування показало, що швидкість

поширення тріщини також залежить від терміну експлуатації. Найменша швидкість поширення стабільної тріщини спостерігається для металу труб в початковому стані $(1-3) \cdot 10^{-4}$ мм/хв, а із збільшення терміну експлуатації труб вона зростає і досягає значень $80 \cdot 10^{-4}$ мм/хв. Автори роблять висновок, що деградація властивостей металу труб в ході тривалої експлуатації є наслідком протікання деформаційного старіння, механізм якого полягає в зменшенні концентрації атомів вуглецю і азоту у вільному стані і зменшенні рухливості дислокацій. У роботі [8] при розрахунку коефіцієнта зниження ресурсу нафтопроводів з критичними дефектами пропонується враховувати деформаційне старіння матеріалу і вплив деформаційного старіння на малоциклову втому при жорсткому навантаженні.

Поряд з механічними характеристиками сталей змінюються також і їх фізичні властивості, насамперед структурночутливі. Структурно чутливі фізичні властивості сталей (електричні, теплові, магнітні) однозначно реагують на будь-які мікроструктурні зміни, що виникають внаслідок деградації металу. З іншого боку, такі зміни призводять і до деградації механічних характеристик. Однакові процеси, які впливають на зміну як фізичних так і механічних характеристик, дають підстави стверджувати, що на вказані структурно чутливі фізичні властивості повинна бути (а в багатьох випадках і є) зосереджена основна увага з точки зору використання їх як інформативних параметрів контролю механічних характеристик сталей. Цілком очевидно, що найбільш економічно та технічно доцільно в даному випадку використовувати методи неруйнівного контролю, причому технічні засоби, що їх реалізують, повинні бути переносними та універсальними з точки зору можливості їх використання на різних об'єктах контролю. Проте в реальних умовах експлуатування сталевих конструкцій є досить важко (або і неможливо) вимірювати деякі фізичні властивості. Це, в першу чергу, стосується електричних і теплових властивостей.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми та цілі подальших досліджень

Проблема забезпечення безаварійної роботи трубопроводів як об'єктів підвищеної небезпеки ускладнена високою пожежонебезпечністю транспортованого продукту, а також конструктивними особливостями прокладання. Внаслідок впливу зазначених вище чинників у сукупності з геодинамічним фактором оточуючого середовища особливої актуальності набуває питання моніторингу фактичних механічних характеристик металу трубопроводів для попередження аварійних ситуацій технічного характеру.

Вітчизняні та зарубіжні вчені за останні 50 років розвинули і постійно вдосконалюють методи, технології та засоби оцінки фізико-механічних характеристик різних металевих матеріалів. При цьому порушувались питання

аналізу змін фізико-механічних характеристик матеріалів у ході експлуатації, однак вивчення їх обмежалося теоретичними і лабораторними дослідженнями, результати яких відображені в багатьох працях вітчизняних та зарубіжних учених. Однак всі існуючі методи не мають теоретичної бази для встановлення кількісних зв'язків параметрів структури із важливими фізичними чи механічними характеристиками. Практично всі залежності, які використовуються для контролю, мають емпіричний характер і часто дійсні тільки для однієї марки або типу матеріалу. Тому існує необхідність у встановленні і вивченні ознак виражених мікроструктурних змін металевих матеріалів труб та розроблення методів і засобів для їх своєчасного виявлення.

Метою даної роботи є дослідження дійсних фізико-механічних характеристик трубних сталей після довготривалої експлуатації та порівняння їх із цими ж характеристиками сталей труб, що не були в експлуатації. Враховуючи вищезгадані умови і термін роботи трубопроводу, дослідження поведінки структури і фізико-механічних характеристик (межа міцності, межа плинності, твердість, відносне видовження, мікротвердість) під дією внутрішнього тиску, температурних перепадів, агресивного середовища, визначення причин зміни фізико-механічних і структурних змін є метою подальшого дослідження.

У ході проведення досліджень необхідно було пропрацювати такі етапи:

- провести неруйнівні дослідження фізико-механічних параметрів зразків трубної сталі 17Г1С, які були взяті в 2012 році з труби магістрального газопроводу Київ – Захід України (КЗУ І,ІІ; діаметр 1020 мм, товщина стінки 10 мм, покриття ізоляції – гумово-бітумне), що експлуатується з 1969 року;

- провести дослідження мікроструктури металу труби і порівняти їх з мікроструктурою металу труби аварійного запасу цієї ж марки;

- встановити основні закономірності зміни мікроструктури та фізико-механічних характеристик трубних сталей в процесі довготривалої експлуатації.

Експериментальні дослідження для виявлення ознак деградації властивостей металу труб тривало експлуатованого магістрального газопроводу

У ході виконання даної роботи було виконано комплекс досліджень фізико-механічних характеристик трубних сталей 17Г1С труб, що були вирізані з трубопроводів Дашава-Київ (1948) і КЗУ І,ІІ (1969,1973), а також труб аварійного запасу, а саме: вимірювання твердості поверхневого шару і в перерізі по товщині стінки, ударної в'язкості, коерцитивної сили, питомого електричного опору, мікротвердості, дослідження макро- і мікроструктури матеріалу трубопроводу. Наступним кроком було порівняння отриманих даних для сталей експлуатованих труб з даними металу труб аварійного

Таблиця 1 - Результати вимірювання твердості сталі 17Г1С експлуатованої труби

Відстань від зовнішньої поверхні по перерізу стінки труби δ , мм	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Середні значення, НВ
2	136	146	141	141,0
4	171	179	170	173,3
6	162	166	158	162,0
8	136	144	151	143,7

Таблиця 2 – Результати вимірювання твердості сталі 17Г1С труби аварійного запасу

Відстань від зовнішньої поверхні по перерізу стінки труби δ , мм	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Середні значення, НВ
2	137	146	135	139,3
4	140	134	141	138,3
6	141	146	136	141,0
8	140	138	142	140,0

Таблиця 3 – Значення механічних характеристик досліджуваної сталі 17Г1С

	Границя міцності σ_B , МПа	Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %
Сертифікатні значення	466	362,3	23	79
Розраховані значення для труби запасу	465	232	36	83,7
Розраховані значення для експлуатованої труби	516	258	32	83,5

запасу, а також з сертифікатними значеннями на труби.

Вимірювання твердості металу в поперечному перерізі стінки труби проводилось серійним портативним твердоміром ТКР-35 з кроком 2 мм поверхневого шару зовнішньої поверхні труби. Результати вимірювання твердості експлуатованого взірця сталі наведені в таблиці 1.

Із досліджень видно, що твердість збільшується по товщині металу, а в середній частині стінки труби спостерігається значний стрибок твердості, що пов'язаний із деформаційним наклепом металу внаслідок довготривалої експлуатації металу, який може викликати з часом розшарування металу, оскільки метал знаходиться в напруженому стані.

Результати вимірювання твердості по поперечному перерізу стінки труби запасу наведені в таблиці 2.

Розподіл твердості по поперечному перерізі труби не має значних відхилень і піків, значення твердості, на відміну від експлуатованого металу, не мають суттєвих відхилень.

Подальший розрахунок фактичних значень механічних характеристик металу експлуатованої труби здійснювався за формулами (1 - 4) для порівняння їх значень із відповідним їм значеннями із сертифікатів на вказані сталі, що були в наявності.

За сертифікатами середні значення границі плинності $\sigma_{0,2} = 362,3$ МПа та границі міцності $\sigma_B = 466$ МПа, відносне видовження $\delta = 23$ %, відносне звуження $\psi = 79$ %.

Розрахункові формули для визначення основних нормованих механічних властивостей мають вигляд [9]:

$$\sigma_B = 3,5 \cdot HB, \quad (1)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{HB}{0,362}, \quad (2)$$

$$\delta = \frac{420 \cdot 100\%}{2\sigma_B + \sigma_{0,2}}, \quad (3)$$

$$\psi = 85,6 - 0,134 \cdot HB, \quad (4)$$

де σ_B – границя міцності, МПа;
 $\sigma_{0,2}$ – умовна границя плинності, МПа;
 HB – твердість за шкалою Брінеля;
 δ - відносне видовження, %;
 ψ - відносне звуження, %.

Результати розрахунків механічних характеристик та відповідні їм значення із сертифікатів наведені в таблиці 3.

Результати таблиці показують, що трубна сталь в результаті 40-річної експлуатації втратила характеристики пластичності металу, а показники міцності збільшились. Спираючись на кількарічні дослідження відомих вчених щодо особливостей деградації трубопроводів, кон-

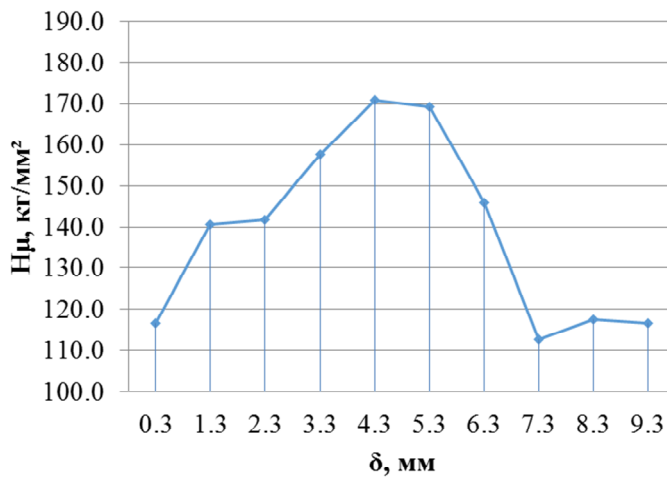


Рисунок 2 – Графік зміни мікротвердості металу по товщині стінки експлуатованої труби

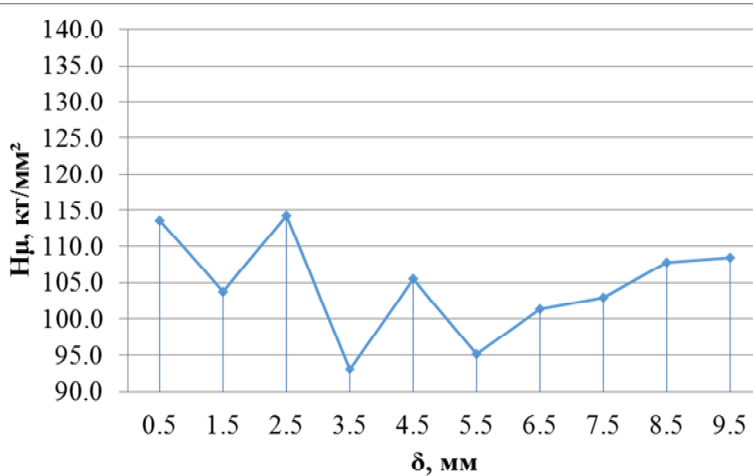


Рисунок 3 – Графік зміни мікротвердості металу по товщині стінки труби аварійного запасу

статуємо, що із збільшенням терміну експлуатації метал накопичує свої міцнісні показники, а, отже, втрачає свою пластичність, окрихчучись при цьому. Це, власне, і підтверджують результати визначення механічних характеристик.

Подальші дослідження передбачали вимірювання мікротвердості, оскільки завдяки малим розмірам відбитку можна вимірювати мікротвердість окремих фаз або навіть окремих зерен. Дані про мікротвердість використовують для вивчення неоднорідності розподілу розчинних домішок по зерну, дослідження пластичної деформації, побудови діаграм фазової рівноваги і т. д. Мікротвердість вимірювали серійним мікротвердоміром ПМТ-3 з використанням епі-об'єктива апертури $A=0.65$ з ціною поділки шкали барабанчика окуляр-мікрометра $C \approx 0.3 \text{ мкм}$.

Мікротвердість металу взірців вимірювалась з кроком 1 мм по всій довжині поперечного перерізу стінки труби. Зміна значень мікротвердості відображена на рисунках 2 і 3.

Із результатів дослідження мікротвердості взірців сталі експлуатованої труби видно, що розподіл мікротвердості є неоднорідним: на графіку спостерігаються значні стрибки зростання мікротвердості.

При проведенні досліджень макроструктури поперечного перерізу по товщині взірця експлуатованої труби було виявлено смугасту ділянку з потемнінням, на якій, власне, і зафіксовані високі значення мікротвердості (рис. 4).

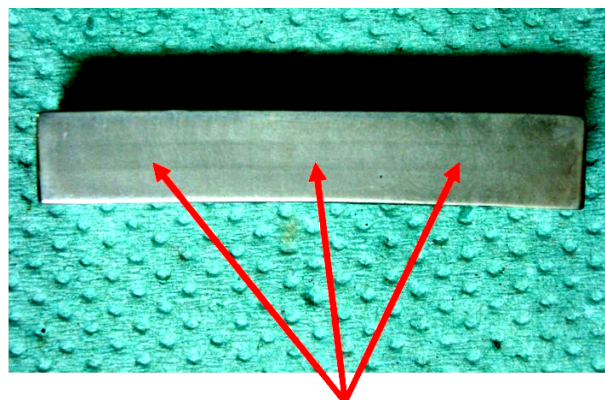


Рисунок 4 – Макроструктура металу поперечного перерізу експлуатованої труби із зміщеною зоною

Це дає можливість зробити припущення, що в межах виявленої зони за час експлуатації відбулось значне виділення карбідних та нітридних утворень, що в сукупності з деформацій-

Таблиця 4 – Значення сертифікатних механічних характеристик та визначених за коерцитивною силою для досліджуваної сталі експлуатованої труби

Сертифікатне значення σ_s , МПа	Сертифікатне значення $\sigma_{0,2}$, МПа	Розрахункове значення σ_s , МПа	Розрахункове значення $\sigma_{0,2}$, МПа
466,0	362,3	533,0	290,0

ним наклепом призвело до різкого зміцнення металу з втратами пластичності, про що і свідчать результати вимірювань.

На зразку металу труби аварійного запасу даної зони не виявлено: значення мікротвердості по перерізу значних відхилень не відображають.

Оскільки спосіб оцінки границі об'ємної міцності за поверхневою твердістю володіє не достатньо високою кореляцією внаслідок ортотропності властивостей матеріалу по товщині, то для інтегральної оцінки границі міцності в локальному об'ємі матеріалу додатково було використано метод коерцитивної сили. Для оцінки характеру змін фізичних властивостей, пов'язаних зі змінами в мікроструктурі, було проведено вимірювання структурночутливого фізичного параметру – коерцитивної сили H_c за допомогою серійного коерцитиметра-структуроскопа КРМ-Ц-К2М з діапазоном вимірювання коерцитивної сили 1 – 40 А/см. Перевагами даного засобу є мала тривалість вимірювального циклу (до 8 с), автономне живлення, невеликі габаритні розміри і маса. Крім того, прилад володіє вбудованою енергонезалежною пам'яттю для зберігання результатів контролю і можливістю передачі даних в ПК.

За результатами вимірювання коерцитивної сили було в подальшому зроблено розрахунковий перехід від коерцитивної сили до границі міцності та плинності для сталі 17Г1С за номограмою, представленою на рисунку 5 [10].

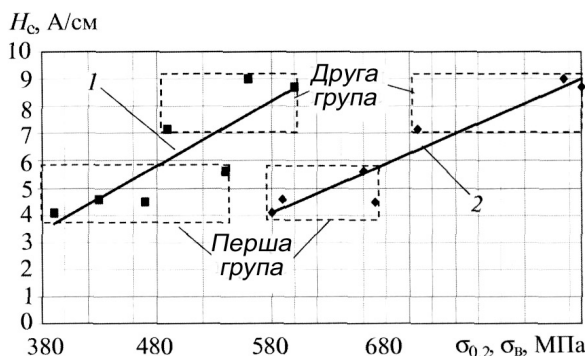


Рисунок 5 – Залежність коерцитивної сили від границі плинності (крива 1) та міцності (крива 2) для сталі марки 17Г1С

Для сталі 17Г1С з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,91$ (рисунок 5):

$$H_c = 0,0237\sigma_{0,2} - 5,54, \quad (5)$$

$$H_c = 0,0183\sigma_B - 8,53. \quad (6)$$

Розраховані значення механічних характеристик та їх сертифікатні значення представлені в таблиці 4.

Результати вимірювання дійсних значень механічних властивостей експлуатованої сталі 17Г1С та порівняння їх з відповідними нормованими значеннями, зазначеними у сертифікаті на сталь, показали, що всі застосовані методи дослідження підтвердили деградацію властивостей металу після довготривалої експлуатації за відсутності видимих ознак появи дефектів типу порушення суцільності.

Для підтвердження ознак і причин деградації матеріалу труб, про які свідчать результати неруйнівного контролю механічних характеристик матеріалу, додатково були проведені металографічні дослідження для проведення порівняльного аналізу мікроструктури експлуатованого протягом 40 років металу та металу труб аварійного запасу. Дослідження мікроструктури металу проводилось металографічним методом на вирізаних візріях. Зразки для металографічних досліджень вирізали на спеціальному верстаті Q-80Z УРМО-80А, який забезпечує автоматичне підтримування заданої швидкості різання відрізним абразивним кругом та інтенсивне охолодження зразка для запобігання спотворенню мікроструктури металу. Вирізани зразки в подальшому шліфували і полірували на пристрої УШПО – 1 з використанням фетрового круга, змоченого суспензією дистильованої води і дрібнодисперсного порошку оксиду алюмінію. Підготовлені таким способом зразки хімічно протравлювали 5%-ним спиртовим розчином пікринової кислоти. За стандартною методикою виготовлено шліфи, поверхню яких піддавали травленню і вивченню під мікроскопом та фотографуванню. Для травлення використано 5%-ний розчин пікринової кислоти в етиловому спирті.

Мікрофотознімки одержувалися металографічним мікроскопом ММО-1600АТ з допомогою цифрової камери КММ-5 для металографічного мікроскопа при збільшеннях 100, 200 і 400. Одержані зображення зберігалися в пам'яті ЕОМ для подальшого їх опрацювання.

Кількісні параметри структури, а саме: середні діаметри зерен, бали зерна визначалися з мікрофотографій за ГОСТ 5639 – 82 з використанням програмного продукту ImageJ версії m1.45.

В ході дослідження мікроструктури було виконано мікрофотографування металу по товщині стінки труби з кроком 2 мм, виділяючи шари, що прилягають до зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби, а також шари, розташовані в середній частині товщини стінки.

З літературних джерел встановлено, що мікроструктура конструкційних низькоуглецевих і низьколегованих сталей (типу 10Г2С, 20Г, 09Г2С, 17Г2СФ, 14ХГС, що використовуються

часто як матеріал для трубопровідного транспорту) у вихідному стані, як правило, являє собою структуру перліту і фериту, що відповідає нормалізованому стану (рисунок 6 а, б) – [11].

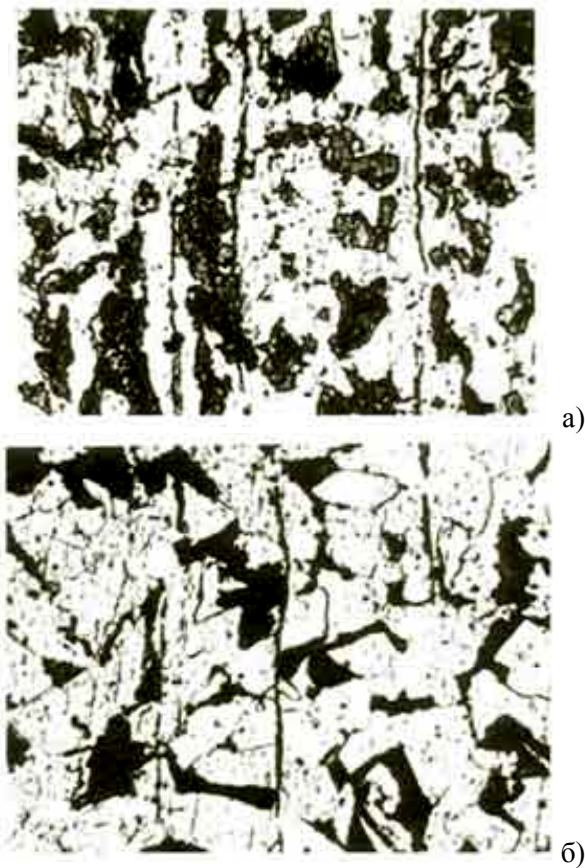
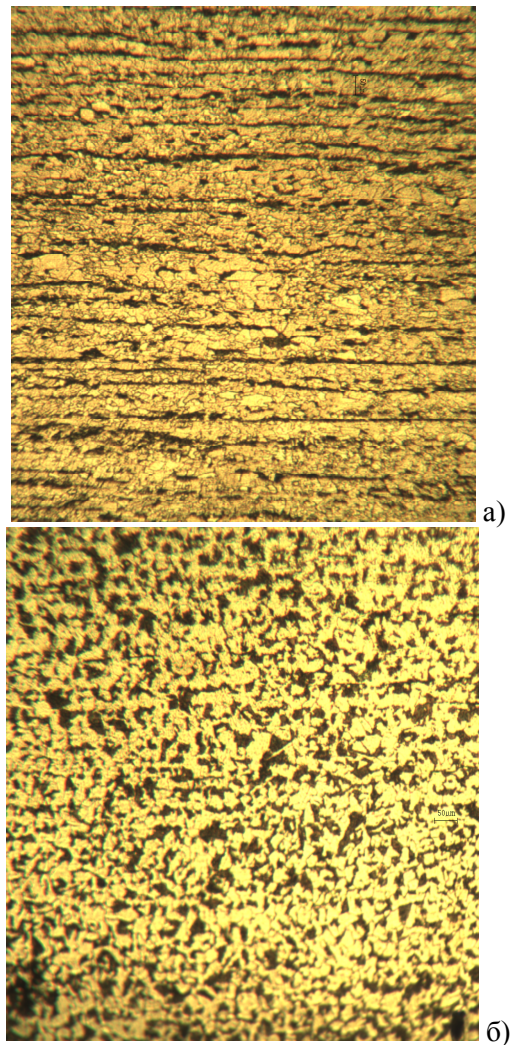


Рисунок 6 – Структура сталей 19Г (а) і 17Г1С (б). Збільшення – 500^x

У структурі досліджуваної сталі аварійного запасу присутня характерна їй дрібнозернистість (рисунок 7, а) (бал феритного зерна варіюється в межах 9 – 10 балів), що пояснює хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей, одержаних при механічних випробуваннях цих матеріалів. Перлітні області складаються з декількох невеликих за розміром колоній з тонкопластичними прошарками цементиту. У структурі перліту відсутні сліди відпуску. За незначного вмісту марганцю для структури характерна феритно-перлітна структура з часткою бейніту. Колонії тонкопластинчастого перліту і бейніту часто об'єднані в одну область. За морфологією бейніт можна віднести до високотемпературної форми. На границях зерен і субзерен фериту спостерігають смужкові виділення цементиту, характерні для високотемпературного розпаду аустеніту при термічній обробці.

Детальним вивченням структури сталей даного класу у вихідному стані й після 40-річного терміну експлуатації зафіксовано, що у вихідному стані (як уже було зазначено вище) в нормальній феритно-перлітній структурі (рисунок 7, а) перліт має пластинчасту та зернисту будову. У деградованій структурі (рисунок 7, б) відсутня смугастість перліту через його частко-

вий розпад, сфероїдизацію, а карбідна складова перліту зміщується до границь зерен. В мікροструктурі експлуатованої сталі спостерігається чітко виражена різнозернистість.

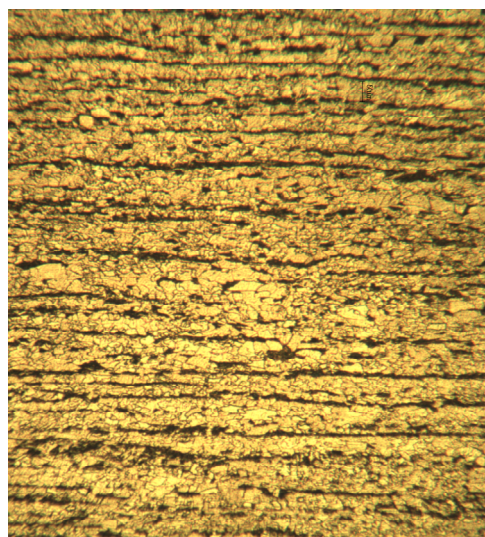


а – сталь труби аварійного запасу;
б – сталь експлуатованої труби (термін експлуатації – 40 років) КЗУ I.
Кратність – 200^x

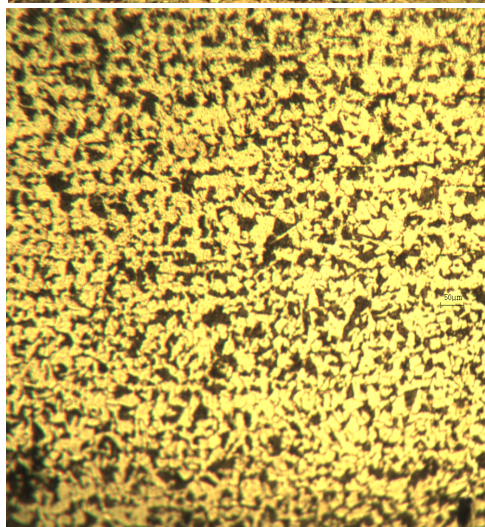
Рисунок 7 – Мікροструктурні зміни сталі 17Г1С після довготривалої експлуатації

Також детальному вивченню мікροструктури піддавалася зона деформаційного наклепу, яка була виявлена в ході вивчення макροструктури. Порівняльні знімки мікροструктури виявленої зони із мікροструктурою зразків із труб аварійного запасу та експлуатованої труби (приповерхневі шари) наведені на рисунку 8.

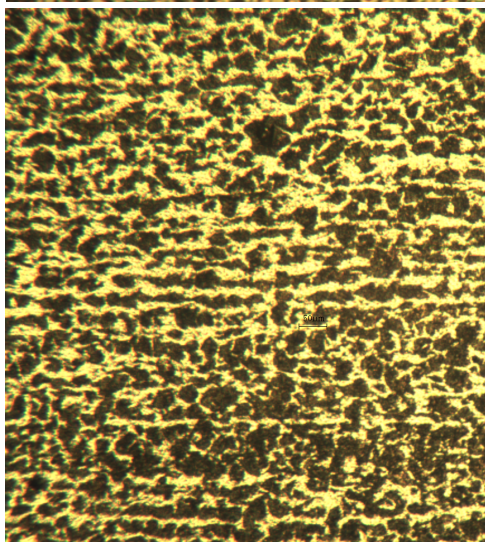
На рисунку 8, в видно, що в мікροструктурі деформаційної зони спостерігається збільшення розмірів зерен фериту і бейніту, частка яких в загальному об'ємі структури значно збільшена, бал зерна перліту № 6-7, орієнтація зерен нерівномірна, границі окремих зерен виражені слабо. А це свідчить про те, що процес «старіння» структури у цій сталі пройшов зі зниженням характеристик пластичності, про що свідчать результати вимірювань границь міцності, плинності і параметрів пластичності.



а)



б)



в)

а – мікроструктура металу труби аварійного запасу; б – мікроструктура металу експлуатованої труби (приповерхневий шар) (термін служби 40 років) КЗУ І; в – мікроструктура деформаційної зони металу експлуатованої труби КЗУ І. Кратність – 200^x

Рисунок 8 – Порівняльні зображення мікроструктури сталі 17Г1С труб з різним терміном експлуатації

Висновки

Результати експериментальних досліджень показали, що структурне старіння низьковуглецевих трубних сталей, у залежності від умов роботи трубопроводу, відбувається у двох напрямках: у структурі деградованих сталей даного класу можливий розпад перліту та коагуляція карбідів, а також деградація властивостей металу труб у ході тривалої експлуатації може бути наслідком протікання деформаційного старіння, механізм якого полягає у зменшенні концентрації атомів вуглецю і азоту у вільному стані та зменшенні рухливості дислокацій, що призводить до зниження пластичних властивостей металу і показників опору крихкому руйнуванню (ударної в'язкості та тріщиностійкості). При цьому загальний структурний стан трубопровідних сталей після нормативного терміну експлуатації свідчить, що морфологія та співвідношення фазових складових не мають значних негативних особливостей і не містять яскраво виражених структурних ознак, що свідчать про помітне прискорення розвитку деградаційних процесів з продовженням терміну експлуатації трубопроводів. Тонка структура трубних сталей показує, що на дислокаціях, границях зерен і субзерен присутня наявність скупчень атомів впровадження і частинок вторинної. Це вказує на те, що за період експлуатації понад 40 років процеси деформаційного старіння і втрати набули значного розвитку.

Загалом деградацію сталей газопроводів можна пов'язати з двома головними чинниками: зміною структури і розвитком пошкодженості за тривалої сумісної дії напружень і абсорбованого металом водню. Розвитку пошкодженості передують також мікроструктурні зміни, які інтенсивніші в околі утворених мікродефектів, що є концентраторами напружень, як це було виявлено в результаті структурного макро- та мікроаналізу.

Зміни в мікроструктурі за час тривалої експлуатації пов'язані із деформаційним старінням металу, яке підвищує міцність і зменшує пластичність та ударну в'язкість. Старіння можливе і за відсутності напружень, наприклад, у трубах аварійного запасу, що тривалий час зберігаються на трубних базах. В той час в експлуатованих трубах процес деформаційного старіння інтенсифікують робочі навантаження. Результати експериментальних досліджень показали, що це старіння проявляється у вичерпанні пластичності, збільшенні коефіцієнта деформаційного зміцнення та зменшенні різниці між границями плинності і міцності.

Виконаний комплекс експериментальних досліджень зразків сталі 17Г1С показав, що її експлуатаційна надійність (у ідентичних умовах роботи) обумовлена початковою мікроструктурою сталей. На початкових етапах експлуатації в мікроструктурі сталі даного класу спостерігається однорідність без істотних аномалій. В процесі подальшої експлуатації цих сталей протягом 30 і більше років початкова структура зазнає незворотних змін. Неоднорідність мікроструктури сталей 17ГС і 17Г1С зу-

мовлює зміну міцнісних характеристик в процесі тривалої експлуатації. Крім того, присутність в структурі цих сталей залишкових незворотних змін робить їх схильними до виникнення і розвитку макродефектів (у тому числі і корозійних).

Отже, з виконаних досліджень випливає, що при оцінці і прогнозуванні залишкового ресурсу газопровідних труб доцільно оперувати не нормативними показниками механічних властивостей, а значеннями, отриманими при інструментальних вимірюваннях як структурно-чутливих фізичних властивостей, так і механічних параметрів. При цьому надається перевага методам та засобам неруйнівного контролю як єдино можливим при обстеженні фактичного технічного стану металу труб в процесі експлуатації трубопровідного транспорту. В цьому випадку стає можливим об'єктивний прогноз залишкового ресурсу і рівня працездатності магістрального газопроводу.

Література

- 1 Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, К.М. Ямалеев, А.В. Росляков. – М.: Недра, 1995. – 222 с. – ISBN 5-247-03080.
- 2 Яковлева Т.Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов / Т.Ю. Яковлева. – К.: Наукова книга, 2003. – 235 с.
- 3 Бабич В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 122 с.
- 4 Бида Г.В. Физическое обоснование контроля ударной вязкости проката из малоуглеродистых и низколегированных сталей магнитными методами / Г.В. Бида, В.М. Камардин // Дефектоскопия. – 1995. – № 10. – С.3-31.
- 5 Волжанин А.В. Диагностика состояния основного металла магистральных трубопроводов со сроком эксплуатации более 40 лет / А.В. Волжанин, А.И. Любомудров, Т.К. Сергеева // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2006. – №3. С.5 – 13.
- 6 Работоспособность трубопроводов. Сопротивляемость разрушению. Часть 2 / Г. А. Ланчаков, Е. Е. Зорин, Ю. И. Пашков, А. И. Степаненко. - М.: Недра, 2001. – 350 с.
- 7 Терентьев В. Ф. Процессы микро- и макроскопической деформации металлических материалов ниже предела выносливости / В. Ф. Терентьев // Металлы – 2003. – №5 – С.73 – 80.
- 8 Лякишев Н. П. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Н. П. Лякишев, М. М. Кантор, В. Н. Воронин // Металлы. – 2005. – №1. – С. 3-16.
- 9 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия: ГОСТ 22761-77 – [Действителен от 1979 – 01 – 01]. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 9 с.
- 10 Применение коэрциметрического метода для оценки микроструктуры стали 17Г1С / Р.В. Агинеи, Ю.А. Теплинский, А.С. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. – 2005. – №1. – С.32-34.
- 11 Архипов О.Г. Оцінка деградації сталей обладнання нафтопереробних і хімічних виробництв / О.Г. Архипов, О.В. Зінченко, Д.О. Ковальов, Р.Г. Заїка. // Металеві конструкції. – 2009. – №2, Т.15. – С.115-122.

*Стаття надійшла до редколегії
29.10.15*

*Рекомендована до друку
професором **Карнашем М.О.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Тацаковичем Н.Л.**
(ТОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд»,
м. Івано-Франківськ)*