

622.697.7
С13

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

Савула Роман Степанович



1
УДК 622.697.4 (043)
С13

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ
ГАЗОПРОВОДІВ В ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
У ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ**

05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті "Львівська політехніка".

Міністерства освіти і науки України.



Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Харченко Євген Валентинович,
Національний університет "Львівська політехніка",
завідувач кафедри опору матеріалів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Говдяк Роман Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
професор кафедри спорудження та ремонту
газонафтопроводів і газонафтоосховищ;

кандидат технічних наук
Яновський Сергій Романович,
Філія Магістральні нафтопроводи «Дружба»
ПАТ «Укртранснафта»,
головний інженер-заступник директора.

Захист відбудеться 28 січня 2014 р. о 11 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, 76019.

Автореферат розісланий «27» грудня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент

Пилипів Л. Д.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Магістральні газопроводи (МГ) відіграють надзвичайно важливу роль у забезпеченні України паливно-енергетичними і сировинними ресурсами і, в той же час, належать до об'єктів підвищеного ризику. Забезпечення надійної експлуатації МГ стало однією з найважливіших загальнодержавних задач, оскільки аварії на трубопроводах можуть спричинити величезні економічні і екологічні збитки. Значна частина розгалуженої мережі газотранспортної системи (ГТС) України перебуває в експлуатації понад 30 років. Зі збільшенням термінів експлуатації все актуальнішою стає проблема ефективної та безперервної роботи трубопровідного транспорту. Працездатність та надійність ГТС забезпечується організацією періодичної оцінки технічного стану елементів трубопроводів та ремонту в місцях виявлених недопустимих дефектів. В кожному конкретному випадку оцінка допустимості виявленого дефекту вимагає комплексного підходу та відповідного обґрунтування щодо проведення ремонтно-відновлювальних заходів. Однією з важливих складових такого підходу є визначення напружено-деформованого стану трубопроводів з урахуванням конкретних умов експлуатації, особливо, в гірській місцевості, де на експлуатаційні напруження, обумовлені дією технологічних і температурних навантажень, накладаються ще й залишкові напруження, пов'язані з пружно-пластичним деформуванням труб в процесі монтажу трубопроводу на криволінійній трасі.

В існуючій практиці оцінки працездатності МГ помітна тенденція, яка поєднує теорію пружності, механіку руйнування, металознавство і неруйнівний контроль. Відомі методи оцінки напруженого стану, міцності і довговічності МГ тривалої експлуатації з дефектами не враховують деяких особливостей експлуатації трубопроводного транспорту у гірській місцевості. У зв'язку з цим, постає потреба удосконалення існуючих методів діагностики і розрахунку МГ, які б враховували такі важливі чинники, як складний характер навантаження, вплив корозійних і водневовмісних середовищ, вологого сірководню, залишкових пластичних деформацій. На розв'язання цієї важливої проблеми спрямована дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках програм НАК «Нафтогаз України» згідно з розпорядженнями Кабінету міністрів України «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» та «Про схвалення Концепції розвитку, модернізації і переоснащення газотранспортної системи України на 2009-2015 роки».

Дисертаційні дослідження виконувалися відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри «Опір матеріалів» Національного університету «Львівська політехніка» і безпосередньо пов'язані з держбюджетними темами «Динаміка та міцність машин і інженерних споруд» (№ державної реєстрації 0107U004842), «Розроблення методів статичного і динамічного розрахунку елементів конструкцій з концентраторами напружень» (№ державної реєстрації 0109U001158), «Розроблення методів аналізу пружно-пластичного деформування і оцінки міцності магістральних трубопроводів з урахуванням наявності дефектів матеріалу» (№ державної реєстрації 0113U001349), що виконувалися на кафедрі.

an 2431 - an 2432

Мета дослідження – забезпечення працездатності магістральних газопроводів в процесі тривалої експлуатації у гірській місцевості за рахунок удосконалення методів аналізу напружено-деформованого стану і оцінки міцності труб з урахуванням деградації матеріалу, відхилення від прямолінійності траси і наявності локальних пластичних деформацій.

Для досягнення поставленої в роботі мети розглядаються такі наукові задачі:

- оцінити структурні зміни в трубній сталі магістральних газопроводів в процесі тривалої експлуатації та їх вплив на фізико-механічні характеристики сталі і коефіцієнти запасу міцності потенційно небезпечних ділянок;

- дослідити вплив локальних пластичних деформацій магістральних газопроводів на фізико-механічні властивості експлуатованої трубної сталі;

- дослідити вплив механічних характеристик матеріалу і відхилення від прямолінійності траси на параметри пружно-пластичного деформування труб в процесі спорудження і ремонту магістральних газопроводів;

- дослідити вплив залишкових напружень, обумовлених локальним пластичним деформуванням магістрального трубопроводу, на напружено-деформований стан та на міцність труби;

- провести експериментальні дослідження пружно-пластичного деформування і міцності труби в лабораторних умовах з метою перевірки допущень, прийнятих у теоретичних дослідженнях, а також вивчення зміни значень коерцитивної сили трубної сталі 17Г1С в процесі експлуатації.

Об'єкт досліджень: працездатність магістральних газопроводів в процесі тривалої експлуатації у гірській місцевості.

Предмет досліджень: забезпечення працездатності магістральних газопроводів тривалої експлуатації у гірській місцевості за наявності деградації трубних сталей, непрямолінійності траси і локальних пластичних деформацій.

Методи дослідження. Дослідження проведені із застосуванням апробованих методів аналізу пружно-пластичного деформування і міцності інженерних конструкцій, методу скінченних елементів, фізико-хімічної механіки руйнування, неруйнівного і руйнівного методів визначення механічних характеристик і напруженого стану металу труб, статистичної обробки експериментальних результатів.

Положення, що виносяться на захист. Закономірності впливу деградації матеріалу, відхилення від прямолінійності траси і наявності локальних пластичних деформацій на працездатність магістральних газопроводів, що тривало експлуатуються у гірській місцевості.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримали подальший розвиток експериментальні дослідження впливу тривалої експлуатації магістральних трубопроводів на фізико-механічні властивості трубних сталей на основі проведення мікроспектрального аналізу матеріалу і комплексних досліджень характеристик міцності, пластичності, циклічної тріщиностійкості, опірності сірководневою корозійному розтріскуванню під напруженням, воднем ініційованого розтріскування, а також корозійної стійкості сталі.

Удосконалено методику експериментального визначення напружено-деформованого стану тіла труби із застосуванням неруйнівних магнітних методів та з'ясовано вплив локальних пластичних деформацій на міцність оболонкової конструкції.

Досліджена чутливість мікротвердості, схильності до воднем ініційованого розтріскування, корозійної стійкості, впливу сірководневого середовища щодо статичних характеристик міцності і пластичності тривало експлуатованої трубною сталі за наявності локальних пластичних деформацій.

Отримали подальший розвиток дослідження сумісного впливу викривлення осі трубопроводу і зміни температури на характеристики напруженого стану труби; встановлена залежність між згинальним моментом і кривизною осі труби з урахуванням зміцнення матеріалу в процесі пружно-пластичного деформування;

Шляхом моделювання локального пружно-пластичного деформування труби як циліндричної оболонки в процесі її взаємодії з абсолютно твердим тілом у вигляді кулі (індентора), вперше встановлено, що в центральній точці контакту кулі з трубою еквівалентне напруження у матеріалі, яке на початковому етапі деформування труби сягає границі текучості, після навантаження труби внутрішнім тиском зменшується приблизно в 1,5 рази. У той же час, напруження на берегах вм'ятини, які в процесі вдавлювання кулі не досягають границі текучості, внаслідок дії внутрішнього тиску в трубі значно зростають і можуть досягати границі текучості матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів. Проведеними дослідженнями встановлено що в процесі експлуатації магістрального трубопроводу відбувається деградація трубною сталі, яка супроводжується зміною її структури, а, відповідно, й механічних властивостей. Деградація структури і механічних властивостей сталі труби в процесі експлуатації обумовлена перерозподілом атомів вуглецю по об'ємах зерен та дифузійною дифузійною атомів хімічних елементів із середовища, в якому експлуатуються труби, у трубку сталь.

Одержані кількісні оцінки механічних характеристик трубних сталей дають можливість уточнення допустимих умов експлуатації трубопроводів з урахуванням дії як технологічних, так і температурних навантажень. Для зменшення впливу температурного перепаду на коефіцієнт категорійності необхідно зварювати замикаючий кільцевий стик при температурі навколишнього середовища $-5...+10$ °С.

Дифузія хімічних елементів у трубку сталь свідчить про доцільність підвищення ступеня очищення газу, що подається в магістральні трубопроводи, від залишків пластових вод. Для продовження терміну експлуатації магістрального трубопроводу доцільним є проведення інгібіторного захисту його внутрішньої поверхні.

Розрахунки напружено-деформованого стану газопроводу показують, що згинальні моменти у його поперечних перерізах, викликані локальною взаємодією труби з опорою, можуть поширюватися на значну відстань, що призводить до суттєвих зміщень стиків труби в процесі капітального ремонту. Для центрування з'єднаних кінців трубопроводу доцільно одночасно застосовувати спеціальні притискні вантажі та стяжні пристрої, що дає можливість забезпечувати належну точність з'єднання і запобігас виникненню надмірних монтажних напружень у трубах. Запропонована

методика визначення згинальних моментів у трубах за результатами геодезичних вимірювань кривизни трубопроводу дає можливість обґрунтовано добирати технічні характеристики центрувальних пристроїв під час їх проектування.

Особистий внесок здобувача:

- проведені дослідження хімічного складу експлуатованої трубної сталі і сталі труб аварійного запасу та оцінені структурні зміни в матеріалі магістрального газопроводу в процесі тривалої експлуатації [2, 4];

- досліджено вплив локальних пластичних деформацій магістрального газопроводу на фізико-механічні властивості експлуатованої трубної сталі [1, 11];

- розроблено математичну модель і комп'ютерну програму для проведення аналізу пружно-пластичного деформування труби магістральних газопроводів з урахуванням механічних характеристик і зміцнення матеріалу, а також криволінійності траси; проведені дослідження процесів пружно-пластичного деформування труб [3, 6, 9, 13];

- із застосуванням методу скінченних елементів досліджено вплив залишкових напружень, обумовлених локальним деформуванням магістральних трубопроводів, на напружено-деформований стан та на міцність труб [7, 10];

- опрацьовані практичні рекомендації, спрямовані на вдосконалення технології ремонту деформованих ділянок газопроводів [5, 8, 12, 14].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на семінарах і науково-технічних конференціях кафедри “Опір матеріалів” НУ «Львівська політехніка» (2009, 2010, 2011, 2012 рр.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (Тернопіль, 2010 р.); на 10-му і 11-ому Міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків у Львові (Львів 2011, 2013 рр.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика – 2011» (Івано-Франківськ, 2011 р.); на 6-ій Міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2011 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова геологія – 2011» (Івано-Франківськ, 2011 р.); на 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій” (Львів, 2012 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу” (Івано-Франківськ, 2012 р.); на 2-ій Міжнародній науково-практичній конференції “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій” (Львів-Дубляни, 2012 р.); на 4-ій Міжнародній науково – практичній конференції «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування» (Луцьк, 2013 р.).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на розширеному засіданні кафедри “Опір матеріалів” Національного університету “Львівська політехніка”.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 5 – у фахових наукових виданнях України.

Структура роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 187 найменувань і 1 додатку. Основний зміст роботи викладений на 151 сторінці і містить 103 рисунки та 34 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано доцільність проведення досліджень та актуальність теми дисертації, встановлено мету та сформульовано необхідні для її досягнення задачі, аргументовано новизну, наукове та практичне значення отриманих результатів, подано відомості про їх апробацію і публікації.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, у яких розглядаються проблеми забезпечення працездатності магістральних трубопроводів в процесі тривалої експлуатації. Звернена увага на те, що більшість магістральних газопроводів Західної України експлуатуються з 60-х і 70-х років ХХ століття.

Практика експлуатації ГТС показує, що забезпечення надійності роботи ділянки трубопроводів, прокладених на схилах гір і пагорбів, становить складну і надзвичайно відповідальну задачу. Про це свідчить багаторічний досвід експлуатації трубопровідних систем розвинутих країн світу в тому числі Росії і України. Відзначено, що значний внесок у розвиток методів оцінки міцності і забезпечення працездатності трубопроводів тривалої експлуатації внесли такі вітчизняні та зарубіжні вчені: А. Б. Айбіндер, А. Л. Бабин, Ю. В. Банахевич, В. П. Березін, Б. С. Білобран, П. П. Бородавкін, А. І. Гальперін, Р. М. Говдяк, В. Я. Грудз, І. І. Капцов, О. М. Карпаш, А. Я. Красовський, Є. І. Крижанівський, І. В. Ориняк, Й. В. Перун, Ю. Д. Петрина, Д. Ю. Петрина, В. І. Похмурський, А. О. Рибаків, М. Д. Середюк, Д. Ф. Тимків, Л. С. Шлапак, R. Bolt, Y. Hashimoto та інші.

Показано, що існуючі підходи оцінки міцності трубопроводів за різних експлуатаційних умов базуються на застосуванні наближених розрахункових схем взаємодії труби та ґрунту з використанням різних гіпотез і допущень. Тому нарізла необхідність розроблення нових і удосконалення існуючих підходів оцінки працездатності магістральних газопроводів тривалої експлуатації у гірській місцевості з урахуванням локальних пластичних деформацій і деградації трубних сталей.

У другому розділі дисертаційної роботи оцінюється вплив тривалої експлуатації трубопроводів на фізико-механічні властивості матеріалу і його залишкову міцність.

Для виявлення структурних змін трубних сталей проведений рентгенівський фазовий аналіз за допомогою дифрактометра загального призначення ДРОН 1,5. В результаті досліджень структури і хімічного складу трубної сталі 17Г1С експлуатованого з 80-х років магістрального газопроводу «Іващевичі-Долина» DN 1200 мм

на ділянці Бібрського ЛВУ МГ виявлено перерозподіл атомів вуглецю по об'ємах зерен. Визначені спектри випромінювання (рис. 1), які свідчать про дифузію атомів хімічних елементів із середовища, в якому експлуатуються труби, у трубну сталь. Перерозподіл атомів вуглецю, а також дифузія хімічних елементів Na, Al, Si, S, Cl, Mn свідчать про розвиток процесів старіння трубної сталі зі зміною їх механічних характеристик. Це підтверджується загальним виглядом мікроструктури поверхні матеріалу експлуатованих труб, для яких проводився аналіз вмісту і розподілу елементів.

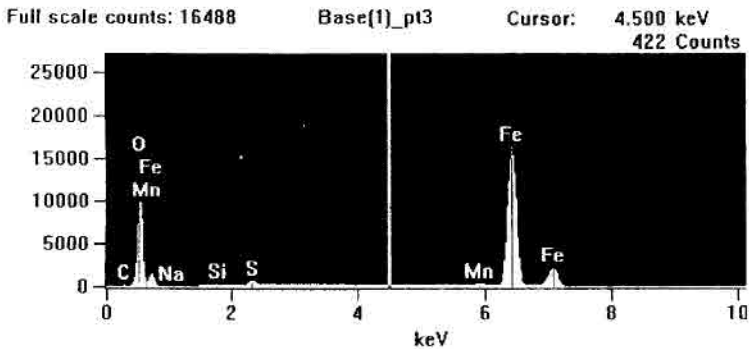


Рисунок 1 – Спектр випромінювання атомів

Проведено металографічні дослідження зовнішньої і внутрішньої поверхонь труб магістрального газопроводу «Івацевичі-Долина» з метою виявлення характеру корозійного пошкодження. Оскільки труби експлуатувалися в середовищі газу та наявної вологи (конденсат) спостерігається пітингова корозія на поверхні сталі. Внутрішня сторона труб покрита плівкою оксидів. Методом дифракційного фазового аналізу виявлено аморфну структуру оксидів, під шаром яких виявлено структуру сталі 17Г1С.

Проведені на розривній машині Р-50 дослідження зразків, виготовлених з матеріалу не експлуатованих і тривало експлуатованих труб, засвідчили незначне підвищення характеристик міцності металу труби, зниження його пластичності, ударної в'язкості, і, відповідно, тріщиностійкості. Середні значення ударної в'язкості експлуатованої сталі за наявності концентратора із зовнішньої сторони труби становлять $102,28 \text{ Дж/см}^2$, а сталі труб аварійного запасу – $139,31 \text{ Дж/см}^2$. Злам випробуваних зразків – в'язко-шаруватий. Зниження ударної в'язкості трубної сталі в процесі експлуатації можна пояснити деградацією металу за рахунок структурно-фазових змін.

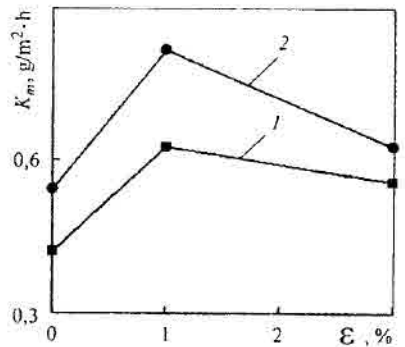
Для дослідження схильності трубної сталі 17Г1С до воднем ініційованого розтріскування використовували прямокутні зразки завдовжки 100 мм (вздовж вальцювання), завширшки 20 мм (впоперек вальцювання) і завтовшки 1...2 мм. Розглядали труби, які не зазнали пластичної деформації та ті, відносна пластична деформація

яких становить 1 та 3%. Зразки витримували, згідно зі стандартом NACE TM-02-84, протягом 96 годин (за необхідності витримку збільшували і, навіть, підкислювали середовище до $\text{pH} \sim 2$) в сірководневому розчині NACE (5% NaCl + 0,5% CH_3COOH , безперервне насичення H_2S зі швидкістю 10 мл/хв, pH 3,0...4,0) при температурі випробувань 20 ± 2 °С. Встановлено, що зразки зі сталі 17Г1С не зазнали ВІР при витримках 96 год, 200год, 720 год, 1440 год, і, навіть, при підкисленні сірководневого середовища до $\text{pH} \sim 2$, що свідчить про високу якість цієї сталі.

Швидкість корозії металу визначали масометричним методом. Прямокутні зразки для досліджень виготовляли як з деформованих, так і з недеформованих труб різної товщини (12,0 та 15,2 мм), виготовлених зі сталі 17Г1С. Досліджували у розчині NACE впродовж 192 год за температури 22 ± 3 °С. Шорсткість поверхні зразків після шліфування становила $R_a = 0,6 \dots 0,8$ мкм. Зразки знежирювали в ацетоні та висушували. Використовували по 3 зразки на один дослід. Після корозійних досліджень зразки промивали водою, висушували, механічно (гумка) видаляли продукти корозії, промивали в ацетоні та висушували. Після 2-х-годинної витримки в ексикаторі зразки зважували. Виявлено, що пластично деформована сталь кородує швидше, ніж недеформована. Сталь, що зазнала відносної деформації 1%, кородує швидше, ніж та, що зазнала відносної деформації 3% (рис. 2), при цьому більш товстостінна (15,2 мм) трубна сталь має вищу опірність корозії, аніж трубна сталь з товщиною стінки 12 мм. Всі зразки кородували рівномірно, без утворення пітингів та виразок.

Досліджували вплив пластичних деформацій на схильність трубної сталі до корозійного розтріскування у сірководневому середовищі. Для цього попередньо витримували зразки у розчині NACE протягом 200 год, а потім у цьому ж розчині активно їх деформували зі швидкістю 10^{-5} , с^{-1} на установці УВП-6. Критеріями схильності до корозійного розтріскування вважали час до руйнування металу, а також зниження характеристик пластичності (δ , ψ) та міцності (σ_T , σ_B) матеріалу в корозивному середовищі у порівнянні з відповідними показниками на повітрі.

За повільного розтягу час до руйнування усіх досліджуваних зразків, витриманих у сірководневому середовищі, скоротився у 2,75–3,5 рази порівняно з результатами випробувань на повітрі. Водночас, зразки зі сталі, деформованої до 1%, руйнуються швидше від більш деформованої, що корелює з результатами досліджень впливу пластичних деформацій на опір корозії сталі. Цей ефект може бути пов'язаний з аномально низьким значенням δ сталі труби, деформованої до 1%. Загалом,



1 – товщина стінки труби 15,2 мм;
2 – товщина стінки труби 12 мм

Рисунок 2 – Корозійна тривкість зразків зі сталі 17Г1С

пластичні деформації труби, мало змінюючи відносне звуження ψ сталі, майже на 40% знижують відносне видовження δ за випробування на повітрі. Сірководневе середовище різко погіршує обидві характеристики пластичності, особливо, ψ . Пластичні деформації також сильніше впливають на ψ (зменшується на 50%), ніж на δ (зменшується на ~30%).

Розподіл мікротвердості по перерізах зразків визначали за допомогою приладу ПМТ-ЗМ, згідно з ГОСТ 9450-76, за навантаження 0,49 Н (50 г). Виконували не менше, ніж три виміри твердості на кожній відстані від торця зразка. Найвищу мікротвердість спостерігали у приповерхневих (до 50 мкм) шарах металу (практично однакову для недеформованої і деформованої труби), після чого вона плавно знижується, досягаючи певного стабільного значення у серцевині стінки труби. Слід підкреслити, що у недеформованих трубах цей стабільний рівень мікротвердості досягається уже на віддалі 0,2...0,7 мм від поверхні і він на 0,39...0,56 гПа вищий, ніж мікротвердість серцевини недеформованого зразка. Рівень мікротвердості серцевини стінки труби, деформованої до 1%, вищий, ніж труби, деформованої до 3%.

Для визначення коефіцієнтів запасу міцності ділянок магістральних газопроводів з урахуванням деградації матеріалу застосовуємо діаграму оцінки руйнування (ДОР), яка ґрунтується на двокритеріальному підході і дає можливість одночасно аналізувати два граничні стани – крихкий та в'язкий. Оскільки матеріальні і часові затрати на експериментальне визначення ударної в'язкості KCV є набагато меншими від затрат на знаходження критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{1c} (КІН), значення коефіцієнта K_{1c} знаходимо за відомими емпіричними залежностями. Розроблені алгоритм і програма розрахунку коефіцієнта запасу міцності $K_{зм}$ і коефіцієнта категорійності $K_{кат}$ тривало експлуатованої ділянки газопроводу з урахуванням зміни параметрів $\sigma_{в}$, $\sigma_{т}$, KCV , K_{1c} . На прикладі однопрогонового балкового переходу досліджено вплив експлуатаційних чинників на коефіцієнт категорійності трубопроводу з дефектами.

У третьому розділі досліджено вплив пружно-пластичних деформацій труб на напружений стан і працездатність магістрального трубопроводу.

Під час проведення капітального ремонту газопроводу з викривленою віссю, внаслідок вирізання пошкодженої ділянки (котушки), труби випрямляються, що утруднює їх подальше з'єднання. У зв'язку з цим розглянута задача визначення моментів, які повинні бути прикладені до торців випрямлених труб за допомогою спеціальних центральних пристроїв для того, щоб привести ці труби у початковий стан. Згинальний момент визначаємо з урахуванням пружно-пластичних деформацій матеріалу за кривизною осі zdeформованої труби, а радіус кривизни визначається, у свою чергу, за результатами геодезичних вимірювань.

На основі розгляду геометрії зігнутої осі трубопроводу (рис. 3) одержуємо формулу для визначення радіуса кривизни осі трубопроводу за результатами вимірювання перепадів висот h_1 і h_2 ,

$$\rho = \frac{a}{2 \cos \alpha_1 \cdot \sin \left[\arctg \frac{\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2}{\cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1} \right]} \quad (1)$$

причому, $\alpha_1 = \arctg \frac{h_1}{a}$; $\alpha_2 = \arctg \frac{h_2}{a}$.

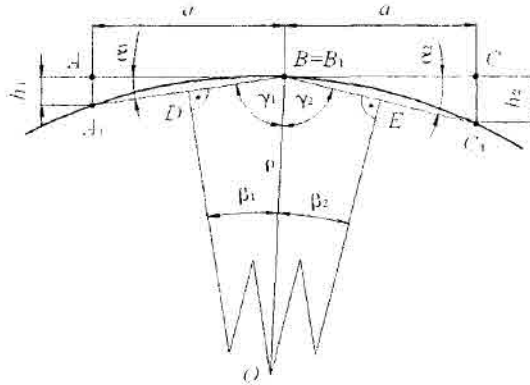


Рисунок 3 – Схема для визначення кривизни зігнутої осі трубопроводу

З урахуванням характеристик схематизованої діаграми розтягу, що враховує зміцнення матеріалу в процесі пружно-пластичного деформування, і геометрії поперечного перерізу труби одержуємо вираз згинального моменту

$$M = \frac{2E}{\rho} I_{z1} + 2(\sigma_\tau - b\varepsilon_\tau) S_{z2} + \frac{2b}{\rho} I_{z2} \quad (2)$$

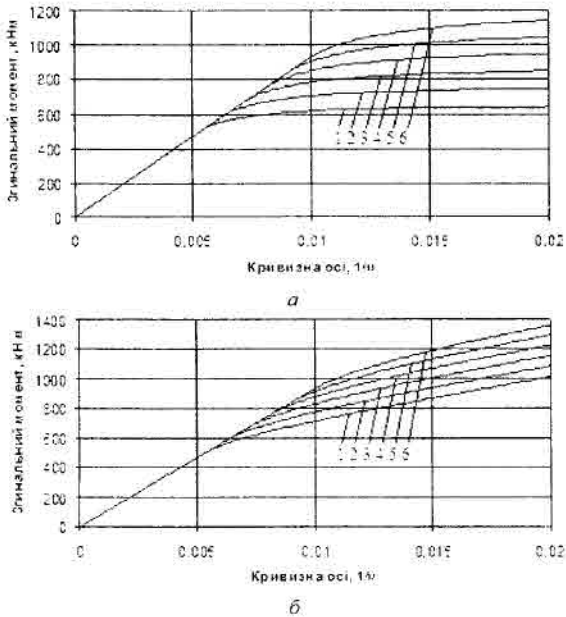
де E – модуль Юнга; σ_τ , ε_τ – напруження і деформація текучості; $b = tg\beta$, де β – кут нахилу ділянки діаграми розтягу в області пружно-пластичних деформацій; I_{z1} – осьовий момент інерції поперечного перерізу зони пружного деформування труби; S_{z2} , I_{z2} – статичний момент і осьовий момент інерції поперечного перерізу зони пружно-пластичного деформування труби,

$$I_{z1} = r^3 \delta \left(\alpha_1 - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right), \quad S_{z2} = 2r^2 \delta \cos \alpha_1,$$

$$I_{z2} = r^3 \delta \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1 + \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \right).$$

причому, r і δ – серединний радіус і товщина стінки труби; α_1 – центральний кут поперечного перерізу труби, що охоплює половину зони пружного деформування.

Як видно із графіків (рис. 4), одержаних із застосуванням залежності (2) для $d=530$ мм; $\delta=8$ мм; $b=0,3E$, зростання напружень у матеріалі із збільшенням деформацій за межею пружності істотно впливає на значення згинального моменту, що необхідно враховувати під час проведення капітального ремонту магістрального трубопроводу.

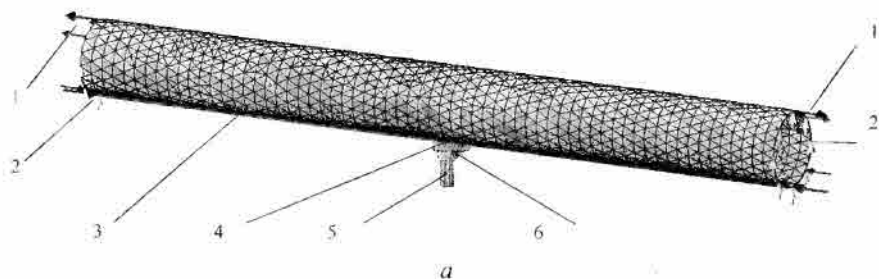


1 – $\sigma_T = 300$ МПа; 2 – $\sigma_T = 350$ МПа; 3 – $\sigma_T = 400$ МПа;
4 – $\sigma_T = 450$ МПа; 5 – $\sigma_T = 500$ МПа; 6 – $\sigma_T = 550$ МПа

Рисунок 4 – Залежності згинального моменту у поперечному перерізі труби від кривизни її осі для ідеально пластичного (а) та для зміцнюваного (б) матеріалу

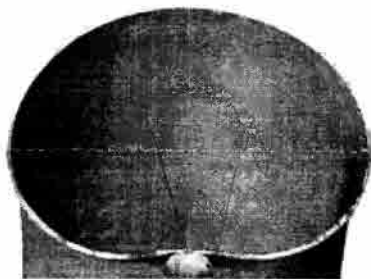
Дослідження впливу локальних пластичних деформацій на напружено-деформований стан труби зовнішнім діаметром 1220 мм і товщиною стінки 15,3 мм проводилося на розрахунковій моделі (рис. 5), яка складається з відрізка циліндричної оболонки (труби) і абсолютно твердого сферичного тіла (індентора), що імітує кам'яну породу. На торцях оболонкового елемента задавали граничні умови у вигляді обмеження переміщень торців у вертикальному напрямі та у вигляді прикладених до торців згинальних моментів від дії відкинутих частин довгомірної ділянки трубопроводу. Взаємодія оболонкового елемента з індентором забезпечується шляхом прикладання до індентора направлено по радіусу оболонки притискного навантаження, яке добиралося таким чином, щоб воно зрівноважувало сили ваги дов-

гомірної ділянки трубопроводу і притискових вантажів. У напрямках, перпендикулярних до напрямку дії навантаження, накладали обмеження на переміщення індентора.



1 – згинальні моменти на торцях моделі, 2 – обмеження переміщень торців у вертикальному напрямі, 3 – труба, 4 – індентор у вигляді півкулі, що імітує кам'янисту породу, 5 – сила, прикладена до індентора в поперечному напрямі, 6 – обмеження переміщень півкулі у горизонтальних напрямках

1 – центральна точка зони контакту;
2 – точки контура вм'ятини



б

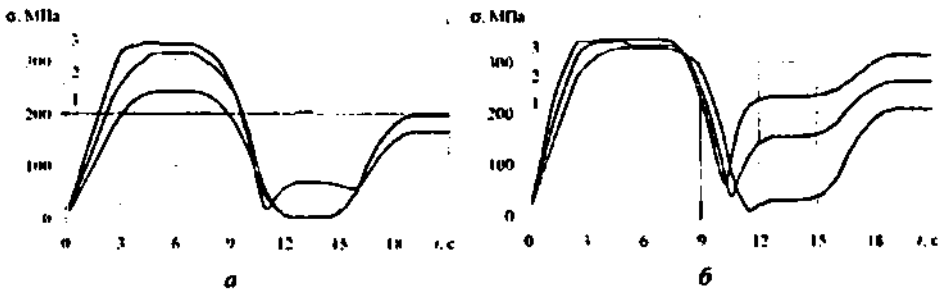
Рисунок 5 – Розрахункова модель труби газопроводу з розбиттям на скінченні елементи (а), і поперечний переріз труби (б) площиною, у якій розташована вертикальна вісь індентора

Як показали результати розрахунків, для забезпечення достатньої для практики точності визначення напружень і деформацій можна приймати довжину розрахункової моделі труби приблизно рівною десяти діаметрам труби.

Розглядали два варіанти взаємодії труби з індентором. Згідно з першим варіантом, процес навантаження системи проводили у два етапи. На першому етапі до торців оболонкового елемента прикладали плавно наростаючі поперечні сили і згинальні моменти, кінцевими значеннями Q_1 та M_1 , а до індентора – відповідну радіальну притискову силу, після чого оболонковий елемент навантажували внутрішнім тиском, який плавно збільшували від нуля до кінцевого значення p_1 . Одержаний характер розподілу еквівалентних напружень у матеріалі труби після прикладання навантажень засвідчив наявність концентрації напружень на контурі вм'ятини. В центральній точці контакту індентора з трубою еквівалентне напруження у матеріалі, яке на першому етапі деформування труби сягає границі текучості, внаслідок дії внутрішнього тиску зменшується приблизно на 14 ... 20 %. У той же час,

напруження на контурі вм'ятини, яке в процесі вдавлювання індентора може не досягати границі текучості, внаслідок дії внутрішнього тиску в трубі значно зростає, досягаючи границі текучості матеріалу.

Згідно з другим варіантом взаємодії труби з індентором, процес вдавлювання індентора в трубу моделювали по аналогії з першим варіантом. Однак, перед навантаженням оболонки внутрішнім тиском взаємодію оболонки з індентором припиняли, відводячи індентор від труби, що обумовило істотне зменшення еквівалентних напружень у характерних точках труби (рис. 6). Це свідчить про доцільність ретельної підготовки траншеї до укладання трубопроводу з усуненням можливості тривалої взаємодії труб з виступами кам'янистих масивів або кусками кам'янистих порід.



- 1 - $Q_1 = 312.1$ кН, $M_1 = 1.875$ МН·м, $p_1 = 5.0$ МПа;
 2 - $Q_1 = 362.1$ кН, $M_1 = 2.875$ МН·м, $p_1 = 5.0$ МПа;
 3 - $Q_1 = 412.1$ кН, $M_1 = 3.875$ МН·м, $p_1 = 5.0$ МПа

Рисунок 6 – Графіки залежності еквівалентного напруження у трубі в центральній точці зони контакту з індентором (а) і на контурі вм'ятини (б) від часу

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений експериментальній перевірці результатів теоретичних досліджень і визначенню граничного стану металу труби в зоні локальних пластичних деформацій. З цією метою змонтували випробувальний напірний резервуар, який складається із котушки з вм'ятиною, чотирьох кілець з зовнішнім діаметром 1220 мм виготовлених із сталі 17ГІС, конусного перехідника і двох сферичних днищ. Котушка з зоною локальних пластичних деформацій була виявлена під час внутрішньотрубною діагностики діючого МГ "Івацевичі-Долина III - нитка". Для закріплення арматури, по якій подається вода був приварений спеціальний патрубок, а для стравлення повітря встановлений штуцер з пробкою.

Якість зварних з'єднань перевірялась візуальним контролем і за допомогою рентгеноскопії та ультразвукової дефектоскопії. Випробувальний напірний резервуар піддавався гідравлічному випробуванню статичним тиском. Створення надлишкового тиску за допомогою води здійснювали плунжерною помпою продувочного агрегата А-30, який змонтований на шасі автомобіля "Краз". Тиск у резервуарі контролювали манометром МО.

Зварювання замкнучого стика резервуара здійснювали при $t^{\circ} = 3^{\circ} \text{C}$, а експериментальні випробування проводили при $t^{\circ} = 29^{\circ} \text{C}$. Сумарна площа вм'ятини дорівнювала $0,48 \text{ м}^2$. Максимальний прогин вм'ятини 65 мм .

Визначення коерцитивної сили різних ділянок резервуара проводили за допомогою приладу коерцитиметра КРМ-Ц-К2М, який укомплектований блоком управління 1 і давачем 2 (рис. 7). Форма і розміри зони локальних пластичних деформацій, і місця установки давачів на котушці випробувального напірного резервуара наведені на рис. 8. Значення коерцитивної сили вимірювали після кожного кроку підняття внутрішнього тиску в резервуарі у точках 1–7, що знаходяться в зоні вм'ятини (рис. 8) і в точці 8, що розміщена поза зоною впливу залишкових напружень від вм'ятини і зварних швів. Вимірювання проводили відповідно в осьовому напрямі, що збігається з віссю котушки, і в кільцевому напрямі, перпендикулярному до осі котушки.

За результатами експерименту побудували залежності зміни величини коерцитивної сили від внутрішнього тиску у випробувальному резервуарі. На рис. 9 зображені залежності зміни коерцитивної сили від внутрішнього тиску p і еквівалентного напруження $\sigma_{\text{е}}$ у випробувальному резервуарі для точки 8 (рис. 8), що розміщена поза зоною впливу залишкових напружень зварних швів і вм'ятини. Крива 1 відображає зміну коерцитивної сили в осьовому напрямку, крива 2 відповідно – в кільцевому напрямку і похила пряма 3 – лінія апроксимації кривої 2.

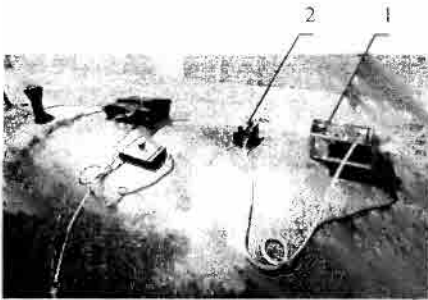


Рисунок 7 – Визначення напруженого стану ділянок резервуара коерцитиметром КРМ-Ц-К2М

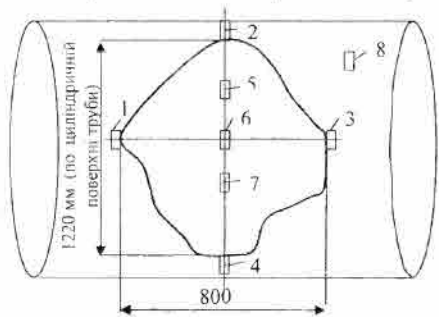


Рисунок 8 – Форма і розміри зони локальних пластичних деформацій і місця установки давачів на котушці випробувального резервуара

На рис. 10 зображені залежності зміни коерцитивної сили в осьовому (крива 1) і кільцевому (крива 2) напрямках, від внутрішнього тиску у випробувальному резервуарі для точки 2 (рис. 8), яка розміщена в зоні переходу від розтягнутих до стиснутих волокон металу стінки труби.

На рис. 11 зображені залежності зміни коерцитивної сили в осьовому (крива 1) і кільцевому (крива 2) напрямках, від внутрішнього тиску у випробувальному резервуарі для точки 6 (рис. 8), яка розміщена на ділянці вм'ятини з максимальним прогином, що становив 65 мм .

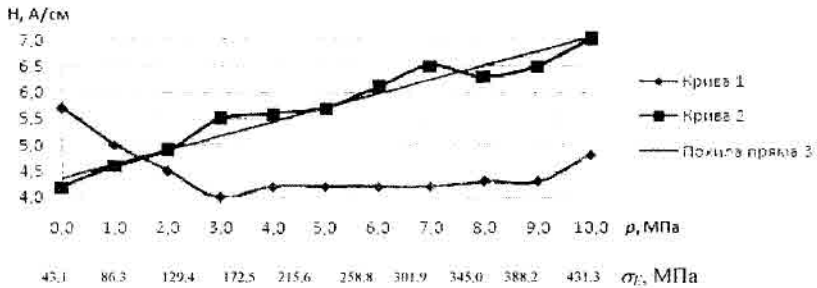


Рисунок 9 – Залежності зміни коерцитивної сили від внутрішнього тиску p і еквівалентного напруження σ_E в точці 8 випробувального резервуара

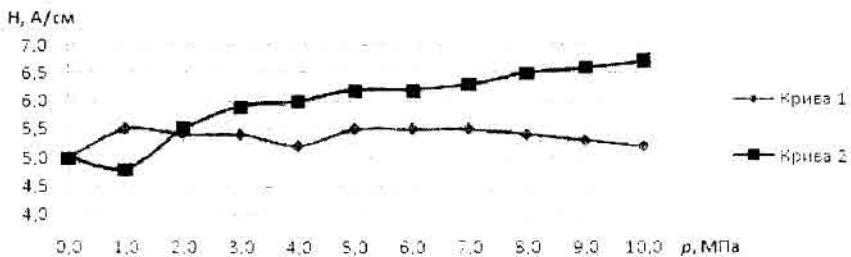


Рисунок 10 – Залежності зміни коерцитивної сили в точці 2 від внутрішнього тиску випробувального резервуара

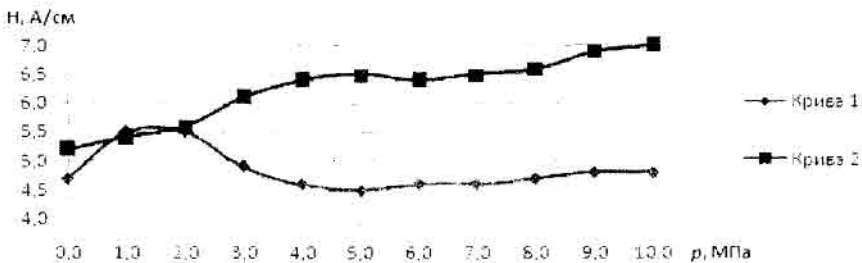


Рисунок 11 – Залежності зміни коерцитивної сили в точці 6 від внутрішнього тиску випробувального резервуара

Руйнування випробувального резервуара відбулося на ділянці перетину кільцевого і поздовжнього швів конусного переходника при досягненні тиску $p = 11,0$ МПа. При цьому еквівалентні напруження в серединній пластично деформованій частині котушки досягли значення $\sigma_E = 474,4$ МПа, що складає 81,8% від границі міцності. Максимальне значення коерцитивної сили перед руйнування деформованої котушки досягло $H_c = 7,0$ А/см.

На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що існує певна закономірність зміни коерцитивної сили в залежності від значень напружень у тілі труби за умови їх пружного і пластичного деформування.

Для розглянутої ділянки МГ, що виготовлена із сталі 17Г1С, за умови її пружно-пластичного деформування з виникненням двовісного напруженого стану, експлуатацію можна проводити, якщо значення коерцитивної сили в напрямі, перпендикулярному до осі труби, задовольняє співвідношення $H_c^{\perp} \leq 6,5$ А/см, а в поздовжньому напрямі до осі труби – співвідношення $H_c^{\parallel} \leq 6,0$ А/см.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що в процесі експлуатації магістрального трубопроводу відбувається деградація сталі 17Г1С, яка супроводжується зміною її структури, а, відповідно, й механічних властивостей. Деградація сталі труби обумовлена перерозподілом атомів вуглецю по об'ємах зерен, а також дифузією атомів хімічних елементів із середовища, в якому експлуатуються труби, у трубну сталь. В результаті мікроспектрального аналізу, проведеного на установці TESKAN, у приповерхневому шарі експлуатованої труби виявлені хімічні елементи Na, Al, Si, S, Cl, Mn. Дифузія цих елементів відбувалася протягом 40 років експлуатації внаслідок впливу пластових вод, які здебільшого містять іони і сполуки згаданих хімічних елементів. Це свідчить про доцільність підвищення ступеня очищення газу, який подається в магістральні трубопроводи, від залишків пластових вод. Наявність вказаних елементів обумовлена також їх дифузією із конденсату. Розвиток процесів старіння трубної сталі підтверджується загальним виглядом мікроструктури поверхні матеріалу експлуатованих труб, для яких проводився аналіз вмісту і розподілу елементів, а також результатами визначення фізико-механічних характеристик сталі.

2. Встановлено, що сталь 17Г1С як деформована, так і недеформована не знала VIP за витримок до 1440 год. навіть за підкислення сірководневого середовища NACE до pH – 2, що вказує на високу якість цієї сталі. Сірководневе середовище NACE практично не впливає на характеристики міцності ($\sigma_{0,2}$ та σ_B) сталі, але суттєво знижує характеристики пластичності (δ , ψ). Під впливом сірководневого середовища суттєво скорочується час до руйнування зразків, виготовлених як з деформованої, так і з недеформованої трубної сталі.

Встановлено, що деформована сталь кородує швидше, ніж недеформована. Наявність пластичних деформацій сильніше впливає на відносне звуження (зменшується на 50%), ніж на відносне видовження (-30%). Показано, що мікротвердість серцевини стінки деформованих труб вища порівняно з мікротвердістю недеформованих.

3. Як свідчать результати досліджень, за наявності пластичних деформацій на значення згинального моменту в трубі суттєво впливає не лише границя плинності матеріалу, а й його зміцнення, що необхідно враховувати під час проектування пристроїв для центрування з'єднаних кінців труб під час капітального

ремонту газопроводу. Показано, що зростання напружень у матеріалі із збільшенням відносних лінійних деформацій за границею пружності може обумовити збільшення згинального моменту у поперечному перерізі труби на 20–30%.

4. Шляхом моделювання локального пружно-пластичного деформування труби як циліндричної оболонки, що взаємодіє з індентором у вигляді кулі, з'ясовано, що в центральній точці контакту індентора з трубою еквівалентне напруження у матеріалі, яке на першому етапі деформування труби досягає границі текучості, внаслідок дії внутрішнього тиску дещо зменшується. Водночас напруження на контурі вм'ятини, яке під час вдавлювання індентора може границі текучості не досягати, внаслідок дії внутрішнього тиску в трубі значно зростає і може досягти згаданої границі, що пояснюється концентрацією напружень на контурі вм'ятини труби. За відсутності взаємодії труби з індентором після її пластичного деформування спостерігається істотне зменшення еквівалентних напружень у характерних точках труби. Це свідчить про доцільність ретельної підготовки траншеї до укладання трубопроводу з усуненням можливості тривалої взаємодії труб з виступами кам'янистих масивів або кусками кам'яних порід.

5. Експериментально досліджено двовісний напружений стан в умовах пружного і пластичного деформування труб випробувального резервуара на основі чого можна констатувати, що процес деформування стінок труби з утворенням вм'ятини і процес зворотного деформування під дією внутрішнього тиску добре узгоджуються з отриманими теоретичними результатами; ділянка з вм'ятиною під дією внутрішнього тиску зберігає свою несучу здатність за $\sigma_k = 557,3$ МПа (значення коерцитивної сили досягає $H_c = 7,5$ А/см. Таким чином, для розглянутої ділянки МГ, виготовленої із сталі 17Г1С, в процесі пружного і пластичного двовісного напруженого стану, експлуатацію розглянутого типу трубопроводу необхідно проводити за умов, коли значення коерцитивної сили в напрямі, перпендикулярному до осі труби, $H_c^{\perp} \leq 6,5$ А/см, а вздовж осі труби – $H_c^{\parallel} \leq 6,0$ А/см.

З'ясовано, що для забезпечення співвісності торців з'єднаних труб під час ремонту деформованих ділянок газопроводів доцільно сумісно застосовувати притискні вантажі і центральні пристрої.

Основний зміст роботи відображено у працях

1. 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.
2. 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: Всеукр. наук.-техн. журн. - Івано-Франківськ: Факел. – 2012. – № 4 (45). С. 87 – 92.
3. Савула Р. С. Оцінка залишкової міцності ділянок магістральних газопроводів з дефектами / Р. С. Савула, Є. В. Харченко, А. О. Кичма // Науковий

вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Спец. випуск), № 2 (32). – 2012. – С. 170 – 174.

4. Савула С. Ф. Структурні зміни в сталях магістральних трубопроводів в процесі старіння / С. Ф. Савула, Є. В. Харченко, Р. С. Савула // Науковий вісник / Збірник науково-технічних праць. Вип. 22.11. – Львів: НЛТУ України, 2012. С. 161 – 167.

5. Савула Р. С. Оцінка міцності ділянок трубопроводів в зонах локальних пластичних деформацій / Р. С. Савула, А. О. Кичма // Наукові нотатки // Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). – Луцьк: Редакційно-видавничий відділ Луцького національного технічного університету, 2013. – Випуск 41. Частина 1. – С. 217 – 223.

6. Кичма А. Оцінка міцності магістральних газопроводів тривалої експлуатації / А. Кичма, Є. Харченко, Р. Савула // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [«Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»], (Тернопіль), 2010. – С. 60 – 61.

7. Кичма А. Особливості проведення внутрішньо трубної діагностики магістральних газопроводів / А. Кичма, Р. Савула // Десятий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові / Праці. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2011. – С. 47 – 49.

8. Харченко Є. В. Визначення напружено-деформованого стану підземних ділянок газопроводів, що експлуатуються в гірських умовах / Є. В. Харченко, А. О. Кичма, Р. С. Савула // Анотації. Міжнародна науково-технічна конференція [«Нафтогазова енергетика – 2011»], (Івано-Франківськ: Вид-во ІФНТУНГ 2011), 2011. – С. 80.

9. Савула Р. С. Діагностика напружено-деформованого стану підземних ділянок газопроводів у гірській місцевості / Р. С. Савула // Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції і виставки [«Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання»], (Івано-Франківськ: Вид-во ІФНТУНГ, 2011), 2011. – С. 78 – 83.

10. Харченко Є. В. Визначення згинального моменту в трубі магістрального газопроводу з урахуванням пружно-пластичних деформацій / Є. В. Харченко, А. О. Кичма, Р. С. Савула // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. Вип. 9. – Львів: Каменяр, 2012. – С. 153 – 160.

11. Кичма А. Визначення залишкової міцності магістральних газопроводів з врахуванням експлуатаційної деградації матеріалу труб / А. Кичма, Р. Савула // Матеріали 3-ої Міжнародної науково-технічної конференції [«Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій»], (Івано-Франківськ: КІНПАТРИ ЛТД), 2012. – С. 29 – 30.

12. Харченко Є. В. Особливості ремонту магістрального газопроводу в умовах пластичного деформування труби / Є. В. Харченко, Р. С. Савула // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції [«Проблеми і перспективи



транспортування нафти і газу”], (Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012), 2012. С. 248 – 250.

13. Дослідження міцності технологічних трубопроводів / З. А. Берник, Я. Р. Корчак, А. О. Кичма, Р. С. Савула // Трубопровідний транспорт, № 6 (78). – 2012. С. 25 – 27.

14. Савула Р. С. Визначення граничного стану металу резервуара в зонах локальних пластичних деформацій / Р. С. Савула, А. О. Кичма / 11-ий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові, 15-17 травня 2013 р. – Львів, 2013. – С. 200 – 201.

АНОТАЦІЯ

Савула Р. С. Забезпечення працездатності магістральних газопроводів в процесі тривалої експлуатації у гірській місцевості. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013.

Дисертація присвячена дослідженням, спрямованим на забезпечення працездатності магістральних газопроводів в процесі тривалої експлуатації у гірській місцевості за рахунок удосконалення методів аналізу напружено-деформованого стану і оцінки міцності труб з урахуванням деградації матеріалу, відхилення від прямолінійності траси і наявності локальних пластичних деформацій. Досліджені структурні зміни, які відбуваються в сталях магістральних газопроводів в процесі тривалої експлуатації. Оцінено вплив процесів старіння трубної сталі та локальних пластичних деформацій магістральних газопроводів на фізико-механічні властивості експлуатованої сталі. Одержані кількісні оцінки механічних характеристик трубних сталей дають можливість уточнення допустимих умов експлуатації трубопроводів з урахуванням дії як технологічних, так і температурних навантажень. Проаналізовано процеси пружно-пластичного деформування труб під час укладання магістральних газопроводів у траншею на викривленій трасі і в процесі капітального ремонту ділянки трубопроводу з заміною котушки та визначені моменти, які повинні розвивати центрувальні пристрої. Досліджено вплив залишкових напружень, обумовлених локальним пластичним деформуванням магістрального трубопроводу, на напружено-деформований стан труби. Проведені експериментальні дослідження пружно-пластичного деформування і міцності труби в лабораторних умовах з метою перевірки допущень, прийнятих у теоретичних дослідженнях, а також вивчення закономірностей зміни коерцитивної сили трубної сталі 17ГІС в процесі експлуатації.

Ключові слова: магістральний газопровід, тривала експлуатація, працездатність, фізико-механічні характеристики трубної сталі, пружно-пластичне деформування, міцність, метод скінченних елементів.

АННОТАЦИЯ

Савула Р. С. Обеспечение работоспособности магистральных газопроводов в процессе длительной эксплуатации в горной местности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. – Ивано-Франковск, 2013.

Диссертация посвящена исследованиям, направленным на обеспечение работоспособности магистральных газопроводов в процессе длительной эксплуатации в горной местности за счёт усовершенствования методов анализа напряжённо-деформированного состояния и оценки прочности труб с учётом деградации материала, отклонения от прямолинейности трассы и наличия локальных пластических деформаций. Исследованы структурные изменения, происходящие в сталях магистральных газопроводов в процессе длительной эксплуатации. Получили дальнейшее развитие экспериментальные исследования влияния длительной эксплуатации магистральных трубопроводов на физико-механические свойства трубных сталей на основании проведения микроспектрального анализа материала и комплексных исследований характеристик прочности, пластичности, циклической трещиностойкости, сопротивляемости сероводородному коррозионному растрескиванию под напряжением, водородом инициированного растрескивания, а также коррозионной стойкости стали. Изучена чувствительность микротвёрдости, склонности к водородом инициированного растрескивания, коррозионной стойкости, влияния сероводородной среды по отношению к статическим характеристикам прочности и пластичности длительно эксплуатируемой трубной стали при наличии локальных пластических деформаций. Получены количественные оценки механических характеристик трубных сталей дают возможность уточнения допустимых условий эксплуатации трубопроводов с учётом действия как технологических, так и температурных нагрузок.

Проанализированы процессы упругопластического деформирования труб во время укладки магистральных газопроводов в траншею на искривлённой трассе и в процессе капитального ремонта участка трубопровода с заменой катушки. Определены моменты, которые должны развивать центрирующие приспособления. Установлена зависимость между изгибающим моментом и кривизной оси трубы с учётом упрочнения материала в процессе упругопластического деформирования. Исследовано совместное влияние искривления оси трубопровода и изменения температуры на характеристики напряжённого состояния трубы.

Исследовано влияние остаточных напряжений, обусловленных локальным пластическим деформированием магистрального трубопровода, на напряжённо-деформированное состояние трубы. Путём компьютерного моделирования локального упругопластического деформирования трубы как цилиндрической оболочки, взаимодействующей с шарообразным абсолютно твёрдым телом (индентором), установлено, что в центральной точке контакта индентора с трубой эквивалентное напряжение в материале, которое на начальном этапе деформирования трубы до-

стигает предела текучести, после приложения к трубе внутреннего давления уменьшается приблизительно в 1,5 раза. В то же время, напряжения на контуре вмятины, которые в процессе вдавливания индентора не достигают предела текучести, вследствие приложения внутреннего давления значительно возрастают и могут достичь предела текучести материала.

Проведенные экспериментальные исследования упругопластического деформирования и прочности трубы в лабораторных условиях с целью проверки допущений, принятых в теоретических исследованиях, а также изучения закономерностей изменения коэрцитивной силы трубной стали 17Г1С в процессе эксплуатации. Усовершенствовано методику экспериментального определения напряжённо-деформированного состояния тела трубы с использованием неразрушающих магнитных методов и установлено влияние локальных пластических деформаций на прочность оболочечной конструкции.

Ключевые слова: магистральный газопровод, длительная эксплуатация, работоспособность, физико-механические характеристики трубной стали, упругопластическое деформирование, прочность, метод конечных элементов.

ANNOTATION

Roman Savula. Ensuring the efficiency of gas main pipeline during long-term operation in the highlands. – Manuscript.

Dissertation for Candidate of Technical Sciences Degree in specialty 05.15.13 – Pipeline Transport, Oil and Gas Storages. – Ivano-Frankivsk National Technical University Oil and Gas. – Ivano-Frankivsk, 2013.

The thesis is devoted to research, which is aimed at ensuring efficiency of gas main pipeline during long-term operation in the highlands by improving the methods of the stress-strain state analysis and strength assessment based on the degradation of pipe material, deviation from linearity route and the presence of local plastic deformation. The structural changes that occur in steel gas mains during prolonged use are researched. The effect of the tubular steel aging process and plastic deformations of local gas mains on physical and operated steel mechanical properties is estimated. The obtained quantitative estimates of the mechanical characteristics of steel pipe enable specification of acceptable conditions of pipelines in view of both process and temperature loads. The process of elastic-plastic deformation during pipe laying gas mains in a trench on the curved track is analysed, as well as during major repairs of pipeline replacement coil and defined points that should develop centering device. In this work is researched the influence of residual stresses due to local plastic pipeline deformation on the stress-strain pipe state. Experimental study of elastic-plastic deformation was held, as well as study of the tube strength in the laboratory to test the assumptions adopted in theoretical studies and the study of patterns of coercive strength change of tubular steel 17H1S during operation.

Keywords: main gas pipeline, long-term operation, performance, physical and mechanical characteristics of pipe steel, elastic-plastic deformation, strength, finite element method.



an2432