

ІННОВАЦІЇ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ НАДІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОПРОВОДІВ У ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГІРСЬКИХ УМОВАХ

Є. І. Крижанівський

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

Надійшла до редакції 19.09.05

Резюме: Розглянуті методи та засоби оперативного контролю за напружено-деформованим станом масивів гірських порід по трасах трубопроводів, що дає змогу відстежити динаміку поля напружень і спрогнозувати розвиток геологічних процесів, а також побудувати схему навантаження об'єкта. Представлено обґрунтування досліджень зміни механічних характеристик трубної сталі для забезпечення надійної експлуатації труб у зсувонебезпечних гірських умовах.

Ключові слова: магістральний трубопровід, зсувонебезпечні гірські умови, напружено-деформований стан, в'язкість руйнування, природне імпульсне електромагнітне поле Землі, тріщиностійкість.

Е. И. Крыжановский. ИННОВАЦИИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОПРОВОДОВ В ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ.

Резюме: Рассмотрены методы и средства оперативного контроля за напряженно-деформированным состоянием массивов горных пород на трассах трубопроводов, что позволяет отделить динамику поля напряжений и спрогнозировать развитие геологических процессов, а также построить схему нагрузки объекта. Представлено обоснование исследований объекта. Представлено обоснование исследований изменения механических характеристик трубной стали для обеспечения надежной эксплуатации труб в оползнеопасных горных условиях.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, оползнеопасные горные условия, напряженно-деформированное состояние, вязкость разрушения, естественное импульсное электромагнитное поле Земли, трещиностойчивость.

Ye. I. Kryzhanivsky. INNOVATION BY SECURING A RELIABLE EXPLOITATION OF PIPE-LINES IN HAZARDOUS LANDSLIDE MOUNTAINOUS AREAS.

Abstract: In the article there have been considered the methods and ways of operative control over the deformation mode of rock range along main pipelines, which gives the possibility to track the dynamics of stress field and to forecast the development of geological processes. It also helps to build the load circuit of the object. The substantiations of the research connected with change of mechanical characteristics of pipe steel for providing reliable exploitation of pipes in hazardous landslide mountainous areas have been presented.

Keywords: main pipeline, hazardous landslide mountainous areas, deformation mode, fracture toughness, natural impulsive electromagnetic field of the Earth, crack resistance.

Стабільна робота магістрального трубопроводу в першу чергу залежить від його технічного стану. При оцінці останнього важливе місце займає достовірне визначення напружено-деформованого стану його лінійної частини, особливо її потенційно небезпечних ділянок, які експлуатуються в екстремальних умовах, спричинених різними перевантаженнями. Як приклад, можна навести численні випадки перенапружень труб внаслідок переміщень оточуючого ґрунту, випинання недостатньо закріплених ділянок газопроводів, надмірного згину труби при укладальних роботах тощо.

Газотранспортна система України як стратегічний об'єкт завжди була під пильним поглядом науковців, в тому числі НАН України. Зокрема, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблена концепція технічної діагностики трубопроводного транспорту [1, 2], в якій представлено обґрунтування досліджень та робіт для гарантування надійної експлуатації труб і трубних вузлів шляхом діагностики їх технічного стану з подальшою оцінкою їх реального залишкового ресурсу. Напрацьовано чимало підходів і методів для реалізації цієї концепції.

Одні з них – це методи, які ґрунтуються на використанні загальної теорії міцності матеріалів. Вони можуть використовуватись лише у випадках ослаблення несучого січення за рахунок зменшення розмірів стінки або зміни механічних властивостей матеріалу. Інші – ґрунтуються на загальних законах механіки руйнування для матеріалів з тріщинами, які прогресують. Є група інтегральних методів, які реагують лише на активацію того чи іншого дефекту. До цієї групи відноситься метод акустичної емісії (АЕ), який достатньо розроблений і широко використовується в світовій практиці.

Всі ці методи дають добрі результати при експлуатації трубопроводів в умовах, де можна планомірно виконувати всі необхідні ро-

боти для реалізації повного дотримання технічних норм. Але вони майже не працюють, якщо трубопровід раптово попадає під дію високих навантажень, наприклад, при зсувах в горах.

Територія Карпатського регіону включає в себе різні за умовами формування та техногенної трансформації типи геологічного середовища, які характеризуються значною геодинамічною активністю. Так, на сьогоднішній день із зафіксованих 16 тис. зсувів на території України більше 30 % знаходиться в межах Карпатського регіону [3]. З точки зору трансформації геологічного середовища шляхом розвитку геологічних процесів у межах Карпатського регіону в останні десятиріччя різко зросла питома вага техногенного фактору. Щодо кількісних показників зсувів даної території, то тут визначені наступні особливості в різних адміністративних областях: територія Чернівецької (близько 1800 зсувів), Івано-Франківської (близько 1800 зсувів), Львівської (близько 1000 зсувів) та Закарпатської (близько 1400 зсувів).

Згідно з результатами повторних геодезичних спостережень встановлено, що з максимальною швидкістю (до 3 мм/рік) проходить підняття Карпатської складчастої області. По напрямку до прогинів швидкість сучасних тектонічних рухів зменшується до 1,0 мм/рік, а на платформі до 0,5 мм/рік.

Саме територіями Івано-Франківської, Львівської та Закарпатської областей проходять транзитні магістральні газопроводи, де є всі передумови катастрофічної активізації зсувів.

При зсувах, гірських ударах, викидах, розривах порід найбільше проявляється перерозподіл напружень в гірській породі.

На зсувах характер розподілу напружень в породах є найбільш складним, оскільки він залежить від цілого ряду динамічних взаємопов'язаних факторів. При підготовці зсуву і

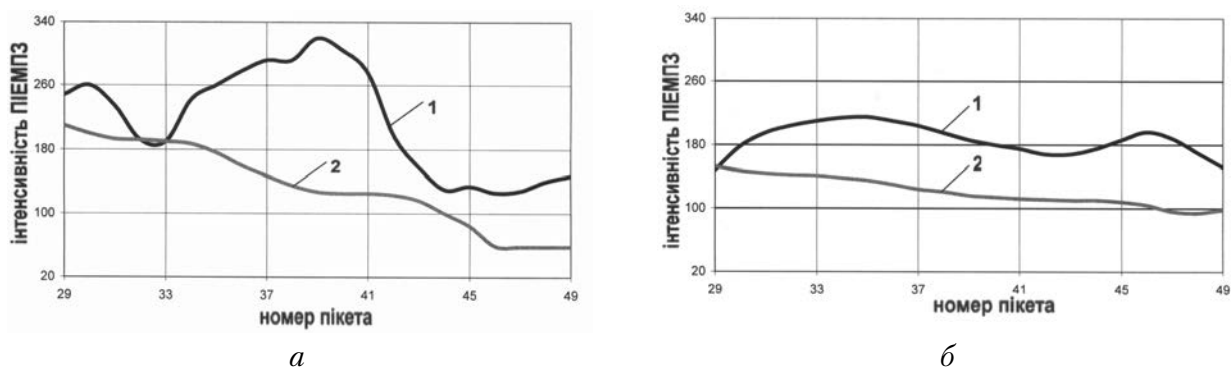


Рис. 1. Інтенсивність ПІЕМПЗ, яка характеризує глибинні (а) і поверхневі (б) вогнища напружено-деформованого стану Богородчанського газосховища на ділянці довжиною 100 м (пікети 29...49): 1 – сховище незаповнене; 2 – сховище заповнене

його утворенні має місце концентрація напружень в окремих місцях з подальшим їх перерозподілом. Різні за своїми кінетичними характеристиками частини зсуву мають і різний напружено-деформований стан порід, що знаходить своє відображення і у варіаціях природного імпульсного електромагнітного поля (ПІЕМПЗ).

Варіаційні спостереження ПІЕМПЗ дають можливість одночасно давати оцінку стану різних ділянок зсуву та зміни цього стану в часі.

Для визначення впливу локальних глибинних напружень на зміну інтенсивності ПІЕМПЗ на різних глибинах гірської породи проводили дослідження на Богородчанському підземному сховищі газу (ПСГ). Вивчення ПСГ даним геофізичним методом дало можливість отримати уточнену інформацію щодо розподілу підвищеного НДС гірських порід і зон релаксації напружень для визначення меж території з можливим розвитком деформаційних процесів, та визначити просторову неоднорідність в загальному полі механічних напружень [4].

Експеримент проводили при різних заповненнях газосховища, тобто при різних

внутрішніх тисках. Перші заміри проводились в червні при мінімально заповненому сховищі із внутрішнім тиском газу 58 атмосфер. Другі заміри виконували в тих же пікетах в грудні при максимально заповненому сховищі з внутрішнім тиском газу 93 атмосфери. Результати досліджень представлялись у вигляді карт ізоліній середньої інтенсивності ПІЕМПЗ.

Важливість проведеного натурного експерименту полягала в можливості виявити небезпечні зони при різних режимах роботи газосховища та прослідкувати залежності зміни інтенсивності ПІЕМПЗ зі зміною завантаженості. При різних тисках порівнювались результати в одних і тих же точках.

Проведені порівняльні оцінки показали, що при збільшенні внутрішнього тиску в ПСГ зменшується амплітуда зміни інтенсивності ПІЕМПЗ для глибинних (рис. 1, а) та поверхневих (рис. 1, б) явищ НДС. Тобто, при більш високому тиску в ПСГ зменшуються механічні напруження в гірському масиві над сховищем. Це можна пояснити тим, що ПСГ – вичерпане газове родовище, гірський масив якого призвів до порушення природної рівноваги та створив вогнища ме-

ханічних напружень в гірській породі. При заповненні підземного сховища газом відбувається зворотній процес – повернення до рівноважного стану гірського масиву.

З викладеного вище випливає, що будь-яке втручання в рівновагу гірського масиву провокує утворення вогнищ механічних напружень, тобто є концентратором напружень та джерелом зародження майбутніх зсувів. Такими концентраторами напружень є траси магістральних газопроводів, прокладених в горах.

Як показали результати виконаних досліджень, використання методу ПЕМПЗ є надійним чутливим інструментом для виявлення локальних глибинних напружень в гірській породі незалежно від природи їх виникнення. Таким чином, уже на початковій стадії формування умов утворення зсуву спостерігається зміна інтенсивності ПЕМПЗ, за допомогою якої можемо визначити межі ймовірного зсуву, що дасть можливість побудувати схему навантаження об'єкта.

В роботі [5] сформульовано та розв'язано задачу про напружено-деформований стан трубопроводу, який перебуває під доволно орієнтованим навантаженням з боку сповзаючого ґрунту. Для фіксованої довжини зони сповзання досліджено залежність рівня допустимого навантаження від напрямку зсуву.

Слід також враховувати, що при зсуві ґрунтів трубопроводи можуть зазнавати суттєвої пластичної деформації на локальних ділянках. Внаслідок цього, в таких місцях можуть виникнути тріщини, здатні до субкритичного підростання, що відіб'ється на здатності трубопроводу витримувати навантаження, а, відповідно, і на його довговічності. Звідси зрозуміло, наскільки важливим є врахування впливу попереднього пластичного деформування на механічні характеристики сталей трубопроводів, особливо на їх тріщиностійкість, як за статичного, так і циклічного навантаження. Разом з тим, у літературі

немає однозначної думки щодо впливу цього чинника на опір росту тріщин у конструкційних сталях. Після холодної деформації їхня тріщиностійкість може зменшуватись, збільшуватись або залишатись незмінною порівняно з її значенням для сталі в недеформованому стані [6].

Для опису пружних властивостей ізотропного твердого тіла в теорії пружності приймаються дві незалежні характеристики пружності: модуль Юнга E і коефіцієнт Пуассона μ . Термін "коефіцієнт Пуассона" використовується, як правило, в тому випадку, коли мова йде про пружні деформації; при непружному деформуванні застосовують термін "коефіцієнт поперечних деформацій". Загальновідомо, що суттєві зміни стану твердого тіла відображаються змінами вказаних характеристик пружності.

Встановлено, що пластична деформація трубної сталі 17Г1С суттєво знижує модуль Юнга та підвищує коефіцієнт поперечної деформації. Такий вплив пластичної деформації проявляється як при розтягу (E_p, μ_p), так і при стиску (E_c, μ_c). Однак за деформації стиску він набагато сильніший. Старіння матеріалу сприяє поверненню його властивостей аж до вихідного стану.

Пластичне деформування до $\epsilon_p = 18\%$ призводить до росту границі втоми сталі 17Г1С. Найбільший ефект досягається при $\epsilon_p = 5-7\%$. При подальшому збільшенні ϵ_p від 18 до 25% значення σ_{-1} падають нижче вихідного рівня.

Відзначимо зниження короточасної тріщиностійкості зразків, які попередньо деформували розтягом (рис. 2). Середнє значення K_C визначене на зразках у вихідному стані, становило $122 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. Із зростанням ϵ_p параметр K_C зазнавав хвилеподібної зміни: до $\epsilon_p = 10\%$ продовжувався його спад, а при $\epsilon_p = 15-20\%$ спостерігалось навіть деяке зростання з наступним новим різким спадом.

Найменшу величину K_C ($93 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$) отримали при $\epsilon_p = 25 \%$.

Результати випробувань на циклічну тріщиностійкість подано на рис. 3. Встановлено, що для діапазону високих значень $\Delta K = 15 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ і вище циклічний наклеп практично не впливає на опір поширенню втомної тріщини. Зниження рівня циклічного навантаження проявляє позитивний ефект обробки сталі 17Г1С при $\epsilon_p = 5 \%$. В даному випадку величина ΔK_{th} зростає від $5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ для сталі у вихідному стані до $7,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ для наклепаних зразків. Пластичне деформування при $\epsilon = 25 \%$ дало зворотній ефект: значення ΔK_{th} впало до $3,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Порогові значення ефективного розмаху коефіцієнтів інтенсивності напружень ΔK_{eff} знаходились для сталі у вихідному стані та наклепаної при $\epsilon_p = 5 \%$ на рівні $2,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. В той же час зразки, пластично деформовані до $\epsilon = 25 \%$, показали величину цього параметру дещо нижчу ($\Delta K_{eff} = 2,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$).

Зниження циклічної тріщиностійкості зразків попередньо пластично деформованих при $\epsilon = 25 \%$ пояснюється вичерпанням більшої частини запасу пластичності та виникненням в їх матеріалі мікротріщин в результаті великих зсувових ефектів.

Вивчений характер впливу дистильованої води на процеси наклепу та старіння, що супроводять розвиток тріщин при експлуатації трубопроводу. Встановлено, що при наведенні тріщини в присутності дистильованої води практично усувається вплив циклічного наклепу та старіння на величину K_C сталі 17Г1С. Результати механічних випробувань підтверджені електроннофрактографічним аналізом зломів зразків.

Показано, що такі експлуатаційні чинники, як циклічне тренування при підвищених амплітудах, циклічне тренування і старіння, разові перевантаження зразків з тріщинами, разові перевантаження і старіння призводять до спаду величини K_C порівняно з її вихідним значенням.

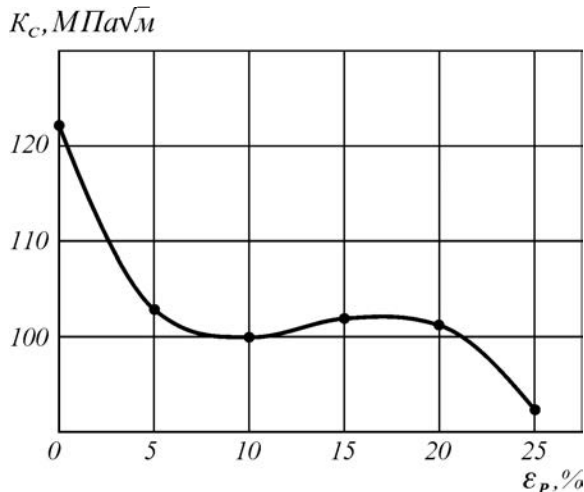


Рис. 2. Залежність в'язкості руйнування сталі 17Г1С від величини попереднього пластичного деформування

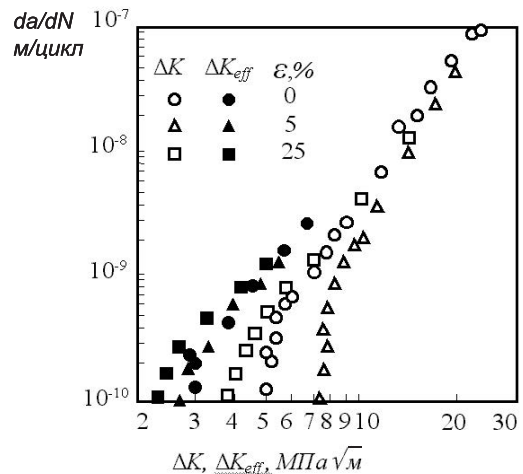


Рис. 3. Кінетичні діаграми втомного руйнування $da/dN-\Delta K$ (світлі символи) та $da/dN-\Delta K_{eff}$ (темні символи), побудовані для сталі 17Г1С у вихідному стані (●, ○) та після її попереднього пластичного деформування (▲, ■, △, □)

Порівняльна оцінка тріщиностійкості трубної сталі 17Г1С за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень і δ_k -критерієм засвідчила [7], що при температурі випробувань 240 К і вище параметр K_{1C} стає недостовірним. Це пов'язано з тим, що при підвищених температурах поширення тріщини супроводжується суттєвою пластичною деформацією, неприпустимою при випробуваннях для підрахунку K_{1C} . Тому при таких експлуатаційних умовах оцінку опору поширенню тріщини доцільно здійснювати за δ_k -критерієм. Очевидно, що даний висновок необхідно враховувати в нормативному документі [8], де оцінка на міцність магістральних трубопроводів з дефектами проводяться тільки за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень.

Викладені вище результати досліджень підтверджують особливості експлуатації газопроводів у зсувонебезпечних умовах і вказують на необхідність їх врахування з метою забезпечення надійної експлуатації об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Патон Б. Е., Недосека А. Я.** Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – № 1. – С. 3–16.
2. **Патон Б. Е., Недосека А. Я.** Концепция технической диагностики трубопроводного транспорта // Там же. – 1992. – № 3. – С. 3–13.
3. **Гошовський С. В., Рудько Г. І., Преснер Б. М.** Екологічна безпека техно-природних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів. – К.: ЗАТ "Нічлава", 2002. – 624 с.
4. **Крижанівський Є. І., Рудко В. П., Саламатін В. М., Шкіца Л. Є.** Прогнозування та попередження зсувів на гірських трасах газопроводів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 3. – С. 5–9.
5. **Крижанівський Є. І., Рудко В. П., Шацький І. П.** Оцінка допустимих навантажень на трубопровід у зоні сповзання ґрунту // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. № 4. – С. 98–100.
6. **Ясній П. В.** Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиноотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
7. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів з позиції δ_k -моделі / Є. І. Крижанівський, В. П. Рудко, О. О. Онищук, Д. Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. – № 2(3). – С. 66–73.
8. В.Б.Н. В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.