

Валерій МАКАРЕНКО¹,
д-р техн. наук, професор
ORCID: 0000-0001-6668-3957
Володимир ГОЦ²,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-7702-1609
Оксана БЕРДНИК²,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-5321-3518
Наталія АМЕЛІНА²,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-3076-8120
Алла МАЙСТРЕНКО²,
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-1152-995X

¹Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКО-КРИХКИХ РУЙНУВАНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТРУБ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРИ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАННЯХ

Розроблений і апробований метод, оснований на принципах акустичної емісії, визначення швидкості розповсюдження тріщин в трубах при полігонних (натурних) випробуваннях при одночасному порівнянні результатів, отриманих на повно товщинних зразках DWTT. Встановлено механізм в'язко-крихкого руйнування труб різного класу міцності і в'язкості. Визначені принципи підвищення спротиву металу труб руйнуванню. Досліджені сталі контрольованої прокатки і прогресивної термічної обробки з використанням прискореного (спреерного) охолодження. Дани рекомендації щодо подовження експлуатаційного (безаварійного) ресурсу газопроводів тривалого терміну експлуатації.

Відомо, що з підвищенням запасу пружної енергії ускладнюються умови роботи металу в конструкції, знижується спротив руйнуванню, зменшується критична довжина тріщини, здатної до самовільного розвитку, і коефіцієнт інтенсивності напружень. В момент утворення тріщини в металі труби запасена пружна енергія практично миттєво подається в зону руйнувань і сприяє його розповсюдженню. Крім того, крім енергії, акумульованої стиснутим газом, в газопроводі акумулюється ще енергія пружної деформації металу. Така пружна енергія запасена в металі труби визначається спільними діями кільцевих і поздовжніх напружень по формулі $A_{\text{пруж}} = 5/32 (p^2 D^2 S)/Eh$, де p – тиск в трубі; D – діаметр труби; S – поверхня труби; h – товщина стінки труби; E – модуль пружності металу. Із наведеної формули видно, що значення запасеної металом енергії пружної деформації визначається робочими параметрами трубопроводу. Так, наприклад, для газопроводу діаметром 1420 мм з робочим тиском 7,5 МПа питома пружна енергія в стінці труби товщиною 14 мм складає 2 МДжм², а для

трубопроводу діаметром 1020 мм з такою ж товщиною стінки і робочим тиском 5,5 МПа – тільки 0,4 МДжм². Слід зауважити, що збільшення пружної енергії металу в конструкції сприяє локалізації деформації в осередку дефекту і прискореному його розвитку.

В магістральних трубопроводах, де використовується велика гамма сталей і висока імовірність наявності концентраторів, підвищений запас пружної енергії сприяє зниженню працездатності металу. Тому потрібно чітко уявляти механізм впливу запасу пружної енергії в металі трубопроводу на його працездатність. Негативний вплив енергії запасеної в металі труб на роботу газонафтопроводів проявляється в їх численних руйнуваннях з важкими економіко-екологічними наслідками, що спонукає вчених до подальшого дослідження цієї проблеми.

Ключові слова: труба, деформація, тріщина, пластична зона, полігон.

Вступ. Відомо [1-2], що в тривалого терміну експлуатації трубні сталі, наприклад, нафтогазопроводів, підземних каналізаційних систем тощо, піддаються деформаційному старінню, що спричиняє окрихчення металу труб з подальшим руйнуванням трубопроводів.

Із літератури відомі методи визначення ступені старіння і окрихчення металу труб, пов'язані з руйнуванням металу, але водночас в останні роки почав застосовуватися метод, не пов'язаний з руйнуванням металу, зокрема акустично-емісійний метод (АЕМ), який є достатньо точним і вірогідним. Метод АЕМ може використовуватися на ділянках трубопроводів без зупинки перекачки продукту, крім того його можна використовувати й на зразках, вирізаних безпосередньо з труб.

Аналіз досліджень і публікацій. Метод акустичної емісії (АЕ) оснований на вловлюванні звукових сигналів, які випромінюються при пластичній деформації в локальних зонах металу труб і розвитку тріщин. Цей метод володіє перевагою, зокрема, в порівнянні, наприклад, з ультразвуковою внутрішньо трубною діагностикою, низькою вартістю (в 3-4 рази), можливістю контролю тріщино утворень в металі труб, дискретністю і можливістю переходу до безперервного контролю технічного стану трубопроводів, малою інерційністю. За допомогою методу АЕ можна досліджувати:

1) вплив зміни структури на тріщиностійкість трубних сталей при тривалій експлуатації трубопроводів; 2) закономірності руйнування металу труб з урахуванням втомленості і старіння; 3) спектральний аналіз акустично-емісійних сигналів; 4) кореляційні залежності між характеристиками сигналів і розвитком тріщин [3].

Акустичною емісією супроводжуються практично усі процеси, які відбуваються в металі труб під навантаженням: рух дислокацій, руйнування зерна шляхом зсуву, деформаційне старіння, утворення мікротріщин, корозійне розтріскування. Основним ефектом, який проявляється при дослідженні методом АЕ є ефект Кайзера, суть якого полягає у відсутності АЕ в матеріалі до тих пір, поки не перевищений рівень напружень попередньої дії [2]. Початкове навантаження, при якому в процесі повторного навантаження появляється акустична емісія, називається коефіцієнтом накопичення.

Дослідженнями встановлено [1-6], що найбільш інформативними, але складними для визначення є параметри, які характеризують форму сигналу АЕ.

Найбільше нової інформації про форму сигналів дає амплітудно-частотний спектр. Характеристики сигналів АЕ в значній мірі залежать від властивостей матеріалу, анізотропії, механічних характеристик, від ступені розшарування, неоднорідності, структури, тощо (рис. 1).

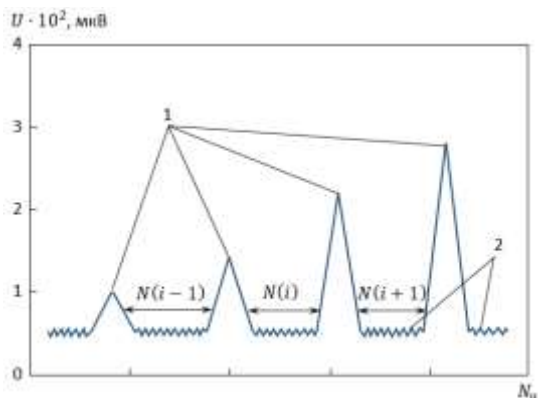


Рис. 1. Ділянка осцилограми отриманій пери циклічному навантаженні зразків:
1 – дискретна АЕ; 2 – неперервна АЕ

Аналіз досліджень і публікацій. АЕ є методом неруйнівного контролю, при якому розвиток дефектів (тріщин) в металі супроводжується генерацією акустичних сигналів.

Роль приймача сигналів грає електроакустичний перетворювач (ЕАП), виготовлений з п'єзокераміки. В наших експериментах використовували апарат АЕ типу “Ультраскан-VN”, в склад якого входили: самописець, осцилограф, магнітний реєстратор, цифро печатний пристрій. При циклічних випробуваннях матеріалів використовували синхронізатори, які дозволяли реєструвати сигнали АЕ в певній фазі навантажень.

Для імітації сигналів АЕ деформованих зістарених трубних сталей на зразок (рис. 2) наносили механічним шляхом надріз. Втомні тріщини в зразках вирощували за допомогою гідро пульсатора моделі “ЦДМпу-10” (Німеччина) при частоті навантаження 10-15 Гц і коефіцієнті асиметрії циклу $R = 0,1 \dots 0,2$.

В процесі розвитку втомної тріщини зразки трубних сталей піддавали циклічним навантаженням до появи тріщин. При цьому паралельно проводили реєстрацію сигналів неперервної АЕ і імпульсні дискретні сигнали АЕ, що дозволяло вирахувати момент початку нестабільного росту тріщини. По числу циклів навантажень між двома імпульсами визначали запас міцності металу. Так як в окрихчених областях швидкість росту тріщин різко зростає, то стрибкообразна зміна швидкості росту тріщин відображається на характері утворення сигналів АЕ. Для виконання подібних операцій електроакустичні перетворювачі розміщали на поверхні зразків по різні сторони від вершини тріщини на лінії її ймовірного розповсюдження.

Враховуючи ефект Кайзера [2], нами визначалися сигнали, які приблизно на 20 дБ перевищували сигнали АЕ неперервної АЕ. Було виявлено, що число

імпульсів нестабільних стрибків тріщин відповідає числу імпульсів дискретної АЕ. Знаючи відстань між числом стрибків циклів навантажень і шириною основи піку стрибків визначали швидкість, їх розповсюдження і ступінь окрихчення металу (див. рис. 2). Амплітуду імпульсів АЕ реєстрували осцилографом НО-43 системи “Сигнал-4М”, або електропромінєвим осцилографом РМ-3234 фірми “Філіпс” (Нідерланди). Отримані дані надали можливість визначити коефіцієнт інтенсивності напружень K_{1C} , при якому відбувається старт тріщини, що відповідає нерівності $t > 2,5 (K_Q/\sigma_{0,2})^2$, де t – товщина зразка (стінки труби). Ця формула відповідає крихкому механізму руйнування, для пластичних матеріалів вона не придатна.

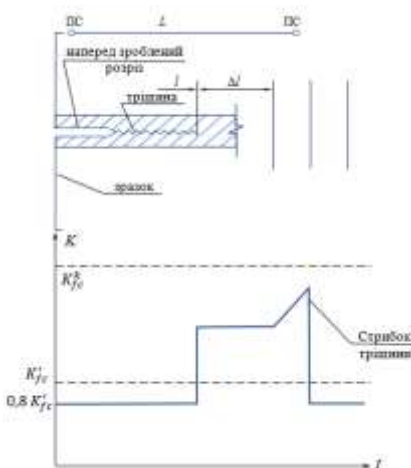


Рис. 2. Схематичне зображення режиму навантаження при дослідженні кінетики росту втомних тріщин

Середня швидкість крихкого стрибка тріщина (одиниця вимірювання в мікронах за мілісекунду) визначали по пройденому шляху (довжина стрибка тріщини) і часу, за який цей шлях пройдений (час від старту до зупинки тріщини). Оскільки в момент старту і раптової зупинки тріщини відбувається перетворення потенційної енергії в кінетичну і зворотно, то ці моменти супроводжуються хвилею пружної деформації в області вершини тріщини, тобто імпульсами дискретної АЕ.

При контролі за параметрами стрибка тріщини використана апаратура має для цього два ідентичні вимірювальні канали. Для цього перетворювачі сигналів АЕ розміщували по різні сторони від вершини тріщини (рис. 2). На рис. 2 одночасно показані геометричні характеристики: L – відстань між перетворювачами сигналів (ПС) АЕ (може бути менше навантаженого об'єкту); l – довжина тріщини (відстань між вершиною тріщини і першим перетворювачем сигналів АЕ); Δl – довжина стрибка тріщини.

Принципова схема визначення швидкості розповсюдження тріщин в трубі в процесі їх натурних випробувань представлена на рис. 3.

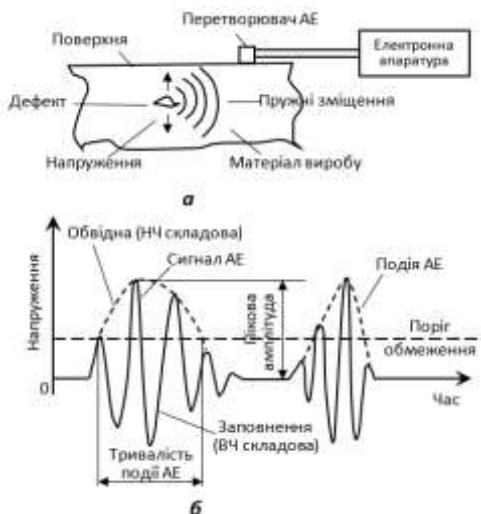


Рис. 3. Принципова схема визначення швидкості тріщино утворення і розповсюдження руйнувань в трубах

Постановка завдання. Ціллю даної роботи є експериментальне дослідження впливу водню на зародження і ріст тріщин в зварних з'єднаннях сталей, які використовуються для будівництва і експлуатації трубопровідних конструкцій в жорстких природньо-кліматичних і інженерних умовах.

Основна частина. Результати натурних випробувань трубних секцій з використання акустично-емісійного методу, описаного детально вище по тексту, наведені на рис. 4.

Дані рис. 4 показують, що ударна в'язкість металу труби 1 на сталі контрольованої прокатки була на 30% вища, чим труби 2 із термообробленої сталі. Однак середня швидкість розповсюдження в'язкої тріщини по двом трубам майже однакова і становить 140-150 м/с. Важно відмітити немаловажний факт що хоча сталі контрольованої прокатки і мали деякі розшарування в зломах але більш ефективно гальмували руйнування чим термооброблені. Крім того встановлено що розшарування проявляється тільки в процесі динамічного руйнування труб чи повно товщинних зразків і не пов'язана з порушеннями цілісності перерізу стінки труби при виробництві листової сталі. Ще необхідно додати, що розшарування металу труб все ж пов'язана з деякою недосконалістю структури, однак металургійні заходи направлені на зниження схильності сталей контрольованої прокатки до розшарування, забезпечать підвищення якості сталі і стабільність властивостей.

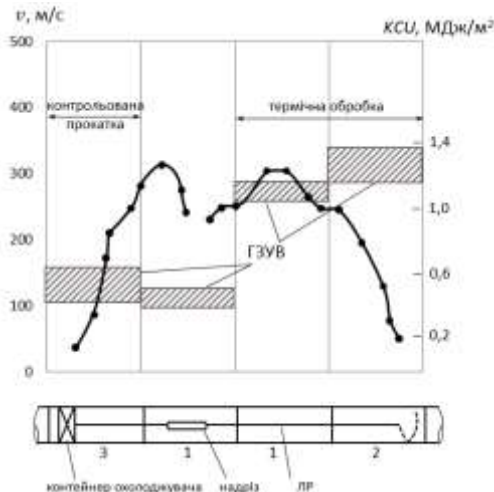


Рис. 4. Зміна швидкості розповсюдження руйнування при випробуванні труб газопроводу 820x14мм із сталей X60 (09Г2С) контрольованої прокатки і X70 (06Г2БА) термооброблені; $P_p = 9,5$ МПа; ГЗУВ – границі зміни ударної в'язкості по Менаже (КСУ); ЛР – лінія розриву

Слід відмітити, що процес контрольованої прокатки був розроблений академіком НАНУ Чигаревим В.В. і реалізований на металургійному підприємстві “Азовсталь” (м. Маріуполь). Прокатка сталевих листів проводилася на потужних станах, дозволяючи забезпечити необхідну ступінь обтиску в достатньо широкому діапазоні температур метала. В якості дослідної сталі використовували низьколеговану і економно модифіковану сталь 06Г2БА, яка відповідала класу X70. В цілому при контрольованій прокатці програмуючи виділення карбонітридної фази в процесі гарячого деформування отримують сталь з найбільш високими показниками по міцності, в'язкості і холодостійкості при мінімальному легуванні (економному модифікуванні). Для подальшої стабілізації підвищених властивостей тут же після закінчення циклу контрольованої прокатки (після чистової клітки) в інтервалі температур від 800 – 700 до 500 – 400^oС здійснюється прискорене регульоване охолодження в спеціальних установках. Ця операція дозволяє завершити структурні перетворення в необхідному напрямку, додатково підвищити міцнісні властивості сталі, практично без зниження характеристик в'язкості і холодостійкості. Поєднання високого ступеню очистки сталі від шкідливих домішок, її мікрomodифікування карбидоутворюючими елементами з процесами неперервної розливки і контрольованої прокатки дозволили отримати особливо якісну сталь для виробництва труб при мінімальній витраті дорогих і дефіцитних легуючих елементів. Все це надасть можливість будівництва потужних газопроводів, призначених для експлуатації в складних природно-кліматичних умовах при знакозмінних навантаженнях.

На рис. 5 наведена мікроструктура сталі 06Г2БА з контрольованою прокаткою і одночасним прискореним охолодженням по спреїрній схемі. На рис. 6

приведена мікроструктура дослідної сталі марки 09Г2С після термічної обробки (загартовування з подальшим високим відпуском).

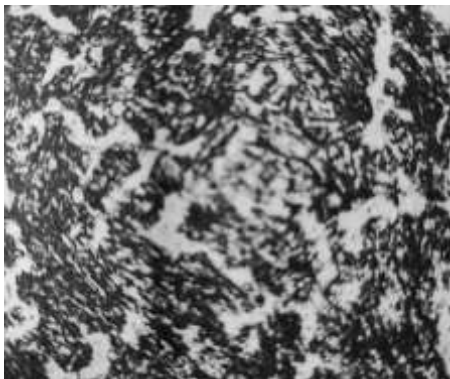


Рис. 5. Мікроструктура сталі 06Г2БА (x800)

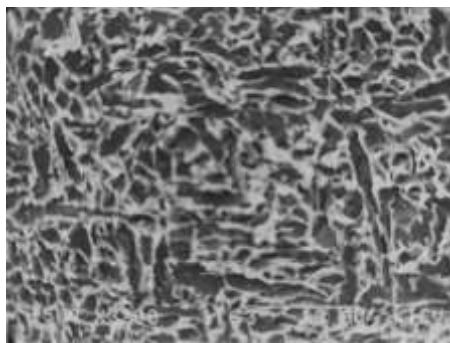


Рис. 6. Мікроструктура термообробленої трубної сталі 08Г2С (x1000)

Використана в експериментах дослідна сталь 06Г2БА у своєму складі містить ніобій – слабкий розкислювач сталі і сильний карбідотворюючий елемент. При наявності в сталі азоту утворює нітриди або карбонітриди. Ніобій є ефективним модифікатором сталі, не спричиняючи при цьому забруднення оксидами, покращує технологічність сталі при її виробництві і сприяє якісній зварюваності. Найбільший ефект досягається при вмісті приблизно 002-003%. Витрати ніобію на 1т сталі в 10 раз менші ніж, наприклад, молибдену. Параметри в'язкості і холодостійкості сталі 06Г2БА наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри в'язкості і холодостійкості сталі

Температура випробувань, °С	В (зразки DWTT), %	КСУ, МДж/м ²	A _п (DWTT), кДж
20	100	2,3-2,8	5,8-6,5
0	100	2,4-2,9	5,6-6,2
-10	100	2,1-2,6	4,5-5,1
-20	90	1,8-2,0	4,6-5,4
-30	80	1,6-1,7	4,2-5,3
-40	70-80	1,7-1,9	4,2-3,9

В табл. 2. приведені вимоги до механічних властивостей трубних сталей (класу Х60 – Х70), призначених для будівництва газопроводів тривалого терміну експлуатації.

Паралельно з пневматичними випробуваннями труб до руйнування проводились дослідження цих же труб на стандартних зразках типу DWTT.

Таблиця 2

Вимоги до механічних властивостей трубних сталей

Параметри газопроводу		Кількість волокнистої складової в зломі зразків ТТ % (не менше)	Полігонні випробування δ _{пл} мм	Робота руйнування	
Діаметр мм	Тиск МПа			КСУ, МДжм ²	DWTT, кДж
720	5.5	55	8-10	1,3	2,8
820	7.5	60	10-12	1,8	3,9
1020	10.0	80	15-17	2,8	4,7
1420	12.0	90	18-20	3,2	5,8

Висновки. Розроблений і апробований метод, оснований на принципах акустичної емісії, визначення швидкості розповсюдження тріщин в трубах при полігонних (натурних) випробуваннях при одночасному порівнянні результатів, отриманих на повно товщинних зразках DWTT.

Встановлено механізм в'язко-крихкого руйнування труб різного класу міцності і в'язкості. Визначені принципи підвищення спротиву металу труб руйнуванню. Досліджені сталі контрольованої прокатки і прогресивної термічної обробки з використанням прискореного (спреерного) охолодження. Дани рекомендації щодо подовження експлуатаційного (безаварійного) ресурсу газопроводів тривалого терміну експлуатації.

Список літератури:

1. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1988. 488 с.
2. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірководневому середовищі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2000. Том 36, №3. С. 93-97.
3. Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної сталі 20ЮЧ з іноземними

аналогами. *Машинознавство*, 1999. 8. С. 52-56. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.52-61

4. Василенко И.И., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Наукова думка, 1974. 265 с.

5. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 1998, 12(12). P. 988-991.

6. Makarenko V.D., Shatilo S.P. Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 1999. 13(12). P. 991-995.

7. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводів них транспортних систем. Харків: ХНАМП. 2009. 184с.

8. Berdnyk O.Yu., Lastivka O.V., Maystrenko A.A., Amelina N.O. Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*. Vol. 907: 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/907/1/012036.

References:

1. Panasyuk, V.V., Andreykiv, A.E., & Parton, V.Z. (1988). Fracture mechanics and strength of materials: A reference guide. Kyiv: Naukova Dumka.

2. Radkevich, O.I., P'yasetsky, O.S., & Vasilenko, I.I. (2000). Corrosion-mechanical corrosion of pipe steel in a hot-water medium. *Physico-chemical mechanics of materials*, 36 (3), 93-97.

3. Chaplya, O., Radkevich, O., Pyasetsky, O., & Spektor, Y. (1999). Rival analysis of corrosion-mechanical properties of 20YuCh laminated steel with foreign analogues. *Mashinознаvstvo*, 8, 52-56. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.52-61

4. Vasilenko, I.I., & Melekhov, R.K. (1974). Corrosion cracking of steels. Kyiv: Naukova Dumka.

5. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P., Astafev, V.I. (1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 12(12), 988-991. <https://doi.org/10.1080/09507119809448548>

6. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P. (1999) Increasing desulphurization of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 13(12), 991-995. <https://doi.org/10.1080/09507119909452086>

7. Samoylenko, M.I. (2009). Funktsionalnaya nadeynost' pipelines of transport systems. Harkiv: HNAMP. 184 s.

8. Berdnyk, O.Yu., Lastivka, O.V., Maystrenko, A.A., & Amelina, N.O. (2020). Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020)*. Vol. 907: 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/907/1/012036

Valeriy MAKARENKO, Volodymyr GOTS, Oksana BERDNYK, Nataliya AMELINA, Alla MAISTRENKO

Study of viscous-brittle fractures of experimental pipes of different manufacturing technologies during natural tests

A method based on the principles of acoustic emission has been developed and tested to determine the rate of crack propagation in pipes during field (full-scale) tests while comparing the results obtained on full-thickness DWT samples. The mechanism

of viscous-brittle fracture of pipes of different strength and viscosity classes was established. The principles of increasing the resistance of pipe metal to fracture are determined. The steels of controlled rolling and progressive heat treatment with the use of accelerated (spray) cooling were studied. Recommendations for extending the operational (trouble-free) life of long-duration gas pipelines are given.

It is known that as the elastic energy reserve increases, the working conditions of the metal in the structure become more difficult, the fracture resistance decreases, and the critical crack length capable of spontaneous development and the stress intensity factor decrease. At the moment of crack formation in the pipe metal, the stored elastic energy is almost instantly transferred to the fracture zone and contributes to its propagation. In addition, in addition to the energy stored by the compressed gas, the energy of elastic deformation of the metal is also stored in the pipeline. Such elastic energy stored in the pipe metal is determined by the combined effects of annular and longitudinal stresses according to the formula $E = 5/32 (p^2 D^2 S)/Eh$, where p – pressure in the pipe; D – pipe diameter; S – pipe surface; h – pipe wall thickness; E – modulus of elasticity of the metal. The above formula shows that the value of the elastic deformation energy stored by the metal is determined by the operating parameters of the pipeline. For example, for a gas pipeline with a diameter of 1420 mm and a working pressure of 7,5 MPa, the specific elastic energy in a 14 mm thick pipe wall is 2 MJm^2 , and for a pipeline with a diameter of 1020 mm with the same wall thickness and a working pressure of 5,5 MPa – only $0,4 \text{ MJm}^2$. It should be noted that an increase in the elastic energy of the metal in the structure contributes to the localization of the deformation in the defect and its accelerated development.

In main pipelines, where a wide range of steels is used and there is a high probability of concentrators, an increased elastic energy reserve contributes to a decrease in metal performance. Therefore, it is necessary to clearly understand the mechanism of influence of the elastic energy reserve in the pipeline metal on its performance. The negative impact of the energy stored in the metal of the pipe on the operation of gas and oil pipelines is manifested in their numerous destructions with severe economic and environmental consequences, which encourages scientists to further study this problem.

Key words: pipe, deformation, crack, plastic zone, landfill.