

# Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

УДК 622.691.4:620.192:539.4

## РОЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛЕЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ У ВТРАТІ ЇХ ЦІЛІСНОСТІ

<sup>1</sup>Г. М. Никифорчин, <sup>2</sup>Ю. В. Банахевич, <sup>3</sup>А. Б. Мицик, <sup>4</sup>В. В. Костів

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України; 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5;  
e-mail: [nykyfor@ipm.lviv.ua](mailto:nykyfor@ipm.lviv.ua)

<sup>2</sup> Публічне акціонерне товариство “Укртрансгаз”; 01021, м. Київ, Кловський узвіз, 9/1;  
e-mail: [banakhevich-yv@utg.ua](mailto:banakhevich-yv@utg.ua)

<sup>3</sup> Управління магістральних газопроводів “Львівтрансгаз”; 79026, м. Львів, вул. І. Рубчака, 3;  
e-mail: [mitcik-ab@utg.ua](mailto:mitcik-ab@utg.ua)

<sup>4</sup> Управління магістральних газопроводів “Прикарпаттрансгаз”;  
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Незалежності, 48; e-mail: [kostiv-vv@utg.ua](mailto:kostiv-vv@utg.ua)

Розглянуто низку чинників можливого порушення цілісності магістральних газопроводів, зумовлених експлуатаційним окрихченням металу труби. Так, на прикладі неповару у кільцевому зварному шві експлуатованої впродовж 53 років труби показано, що створена ним концентрація напружень ще недостатня для росту тріщини у матеріалі з вихідними властивостями. Однак тривала експлуатація призвела до різкого окрихчення сталі, що посилює її чутливість до концентрації напружень, і тому руйнування стало можливим.

Інший важливий чинник полягає в істотному зниженні опору корозійно-механічному руйнуванню. Тут необхідно враховувати агресивну роль водню, джерелом якого слугують електрохімічні реакції з робочими середовищами металу і зовнішньої, і внутрішньої поверхонь труби. Особливо наголошено на можливості наводнювання стінки труби через корозійно-наводнювальну здатність транспортованого газу. Розглянуто корозійно-механічне руйнування зварних з'єднань, у тому числі кільцевих, яке, враховуючи низький рівень осьових напружень у трубі, можливе лише за інтенсивної експлуатаційної деградації металу. В наведених прикладах найнижчим опором руйнуванню володіє зона термічного впливу.

Порушення цілісності труб може бути спричинене також макророзшаруванням всередині стінки. Визначальна роль у такому руйнуванні належить наводнюванню металу з боку внутрішньої поверхні труби через конденсацію на ній вологи.

Ключові слова: тріщина, корозійно-механічне руйнування, воднева крихкість, макророзшарування.

Рассмотрен ряд факторов возможного нарушения целостности магистральных газопроводов, вызванных эксплуатационным охрупчиванием металла трубы. Так, на примере неповара в кольцевом сварном шве эксплуатируемой на протяжении 53 лет трубы показано, что созданная им концентрация напряжений еще недостаточна для роста трещины в материале с исходными свойствами. Однако длительная эксплуатация привела к резкому охрупчиванию стали, что усилило ее чувствительность к концентрации напряжений и сделало разрушение возможным.

Иной важный фактор состоит в существенном снижении сопротивления коррозионно-механическому разрушению. Здесь необходимо учитывать агрессивную роль водорода, источником которого служат электрохимические реакции с рабочими средами металла и на внешней, и на внутренней поверхностях

трубы. Особое внимание уделено возможности наводороживания стенки трубы из-за коррозионно-наводороживающей способности транспортируемого газа. Рассмотрено коррозионно-механическое разрушение сварных соединений, в том числе кольцевых, которое, учитывая низкий уровень осевых напряжений в трубе, возможно только при интенсивной эксплуатационной деградации металла. В наведенных примерах зона термического влияния отличается наихудшим сопротивлением разрушению.

Нарушение целостности труб может быть вызвано и макрорасслоением внутри стенки. Определяющая роль в таком разрушении принадлежит наводороживанию металла со стороны внутренней поверхности в результате конденсации на ней влаги.

Ключевые слова: трещина, коррозионно-механическое разрушение, водородная хрупкость, макрорасслоение.

A number of factors of the possible integrity damage of the main gas pipelines caused by working embrittlement of the pipe's metal are examined. On the example of incomplete penetration in the circular weld of a pipe, operated during 53 years, it has been shown that the created stress concentration is not enough for the crack growth in a material with initial properties. However, a long exploitation has led to a rapid steel embrittlement that caused its response to stress concentration and made damage possible.

Another important factor consists in reduction of resistance to stress corrosion fracture. Here the aggressive role of hydrogen should be taken into account, the source of which are electromechanical changes with metal's operating environment both on outer and inner surface of a pipe. A particular attention has been paid to the possibility of the pipe wall hydrogenation through the corrosive and hydrotreating ability of the transported gas. The corrosive and mechanical damage of weld joints including the circle ones that is possible only by intensive steel working degradation, taking into account the low level of axial stress in a pipe is studied. In the provided examples the heat affected zone has the worst resistance to the damage.

The pipes integrity loss can be caused by macroseparations inside a wall. This is due to the metal hydrogenation in the inner surface because of condensation on it.

Keywords: crack, corrosion-mechanical fracture, hydrogen embrittlement, macroseparation.

### Вступ

Тривала експлуатація газотранспортної системи України висуває у число ключових причин порушення її цілісності втрату вихідних фізико-механічних властивостей сталей труб, які закладалися в інженерні розрахунки ще на стадії проектування [1, 2]. Це означає, що стабільність упродовж експлуатації, в першу чергу, механічних властивостей, стає не менш важливим, ніж їх вихідні значення. Як схематично показано на рис. 1, матеріал А з двох конкурентних варіантів досягає свого гранично допустимого значення за певною механічною властивістю при меншій тривалості експлуатації, ніж матеріал Б, незважаючи на свої кращі вихідні властивості. Під узагальненою механічною властивістю, що визначає ризик порушення цілісності тривало експлуатованих трубопроводів, можна вважати опірність матеріалу крихкому руйнуванню, яка найчутливіше відбиває зміну його стану.

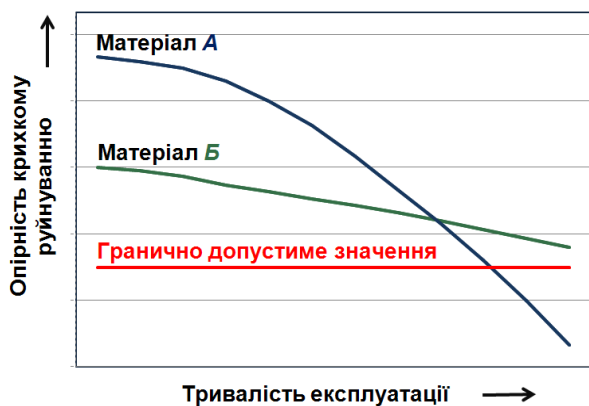


Рисунок 1 - Схематичне представлення зміни впродовж експлуатації трубопроводу визначальної для забезпечення його цілісності механічної властивості матеріалів А і Б

Принципово важливу роль у деградації сталей магістральних газопроводів відіграють агресивні корозивно-наводнювальні середовища. На зовнішній поверхні труби така деградація проявляється у місцях порушення функціональних властивостей ізоляційного покриття. При цьому створюються умови для, з одного боку, зародження корозійно-механічної тріщини за механізмом локального анодного розчинення, а з іншого – локального наводнювання металу та поширення утвореної тріщини вже за механізмом водневого окрихчення. Але і транспортований газ може бути хімічно агресивним. Ця проблема очевидна для промислових трубопроводів через забрудненість транспортованого продукту, однак і газ у магістральних газопроводах не можна вважати повністю інертним через певну його вологість. Вона є джерелом електрохімічних реакцій з виділенням на внутрішній поверхні труби атомарного водню [3], який може абсорбуватися металом та переміщатися по товщині стінки до зовнішньої поверхні. За таких умов не тільки механічні напруження, але і їх сумісна дія з наявним у металі воднем виступають чинниками експлуатаційної деградації металу. Зазначимо, що в цьому випадку роль середовища не така локальна, як на зовнішній поверхні: вона поширюється на значні ділянки трубопроводу, які контактують з вологим газом.

У праці виділено низку особливостей впливу деградації трубопровідних сталей на порушення цілісності магістральних газопроводів.

### Чутливість до концентрації напружень експлуатаційно окрихненого металу

Головна небезпека експлуатаційної деградації трубопровідних сталей полягає в істотному зниженні їх опору крихкому руйнуванню [1, 2]. Відповідно, знижуються й інші фізико-



Рисунок 2 – Приклад зародження та поширення тріщини від концентратора напружень, спричиненого непроваром у кільцевому зварному шві газопроводу

механічні властивості, які пов'язані з окрихченням металу. До них належить і чутливість до різного типу концентраторів напружень, яких неможливо уникнути на практиці.

На рис. 2 наведено приклад зародження тріщини від непровару у зварному кільцевому шві експлуатованої впродовж 53 років труби магістрального газопроводу. Ударна в'язкість  $KCV$  металу зварного шва склала лише 38 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 3), що вказує на вкрай низький опір крихкому руйнуванню, який могла спричинити лише тривала експлуатація трубопроводу. На це вказує результат порівняння значень  $KCV$  у вихідному та різний час експлуатованому металі. Очевидно, що створена непроваром концентрація напружень була недостатньою для зародження тріщини в матеріалі у вихідному стані, оскільки він володів достатнім запасом пластичності. І тільки з часом, через істотне окрихчення сталі впродовж експлуатації, виникла така можливість.

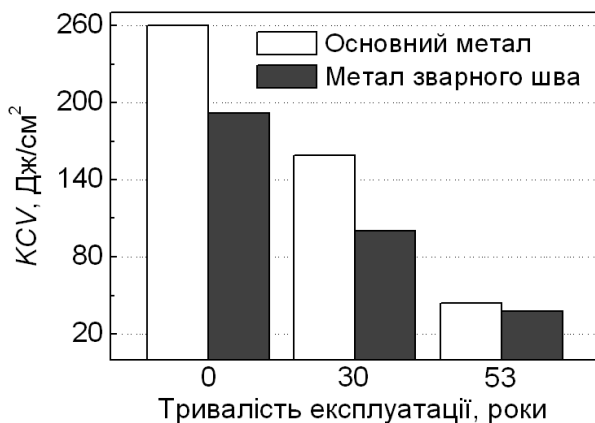
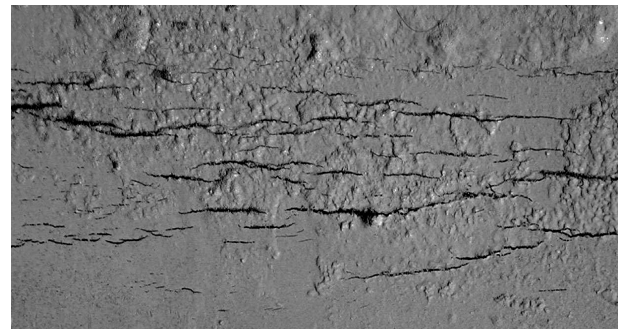


Рисунок 3 – Зміна ударної в'язкості  $KCV$  сталі 17Г1С (основного металу та металу зварного шва) в ході експлуатації

#### Корозійно-механічне руйнування труб

На рис. 4 наведено типові приклади корозійно-механічного руйнування магістральних газопроводів, які вважаються основною причиною їх розгерметизації. Це можуть бути як тріщини корозійного розтріскування, так і корозійної втоми. Зазначимо, що найчастіше такі

тріщини поширюються у напрямку від зовнішньої поверхні. Цьому є пояснення: а) порушення властивостей ізоляційного покриття, що робить можливим доступ ґрунтового середовища до поверхні металу; б) напруження на зовнішній поверхні труби максимальні; в) поєднання впливу наведених чинників, яке посилює процес тріщиноутворення.



а)



б)

Рисунок 4 – Типові приклади корозійно-механічного руйнування труб газопроводів, спричинені зародженням тріщини з боку зовнішньої поверхні: на поверхні труби (а) та в перерізі труби (б) (стрілкою вказана зона поширення тріщини)

Однак реалізації стадії зародження тріщини недостатньо для втрати цілісності трубопроводу. Необхідні умови для її розвитку вглиб стінки труби, тобто матеріал повинен бути чутливим до корозійно-механічного руйнування за дії на нього робочих напружень та агресивного середовища (як правило, за водневим механіз-



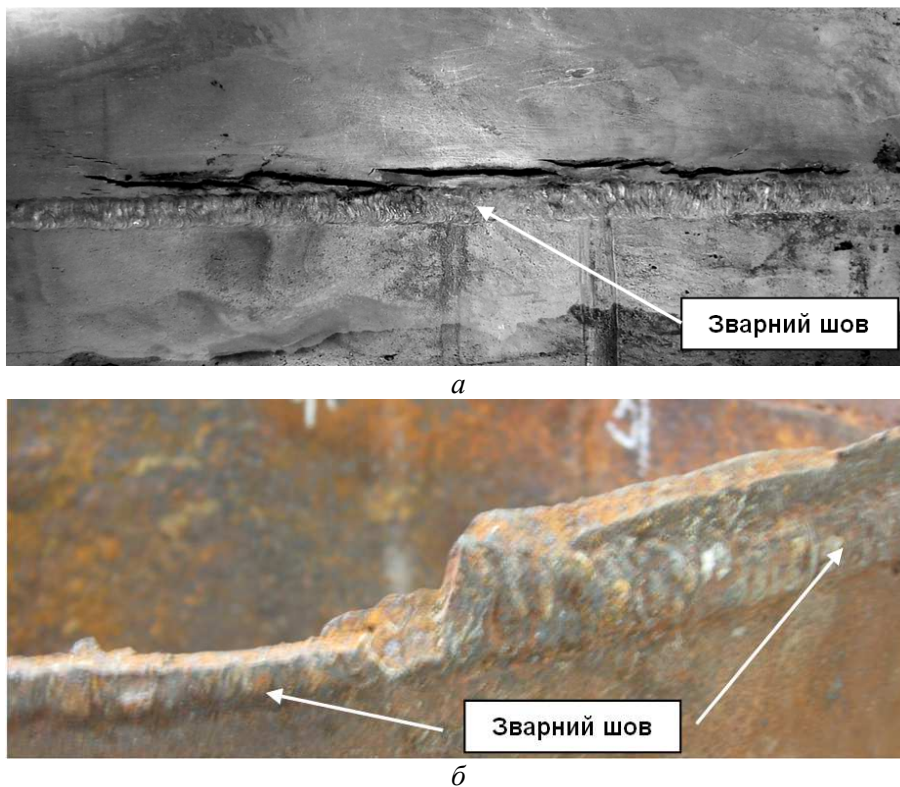


Рисунок 5 – Типові приклади корозійно-механічного руйнування зварного з'єднання від зовнішньої поверхні у повздовжньому шві (а) та від внутрішньої поверхні у кільцевому зварному шві (б)

мом). Трубопровідна сталь у вихідному стані не виявляє такої чутливості, оскільки опірна водневій крихкості, однак у процесі тривалої експлуатації її стан змінюється, і така чутливість виникає через можливість поширення тріщини в наводненому матеріалі. Це означає, що у випадку зародження тріщини від зовнішньої поверхні труби порушення захисних властивостей ізоляційного покриття є можливо і необхідно, але недостатньою умовою корозійно-механічного руйнування. Слід враховувати і деградацію металу, яка істотно знижує опірність поширенню корозійно-механічної тріщини.

Якщо ж функціональні властивості покриття не порушені, а ступінь експлуатаційної деградації металу висока, то тріщини можуть зароджуватися і від внутрішньої поверхні труби, як за механізмом локального анодного розчинення, так і водневого окрихчення, враховуючи наводнювання металу саме від цієї поверхні. Тут слід брати до уваги, що сам процес наводнювання супроводжується утворенням внутрішніх розтягувальних напружень [4,5], що полегшує утворення тріщини. Зазначимо, що при цьому можливий складний градієнт деградації металу по товщині стінки труби, оскільки механічні напруження і концентрація водню в металі, як чинники його деградації, будуть максимальні на різних поверхнях труби.

#### Цілісність зварних з'єднань

Метал зварних з'єднань труб вважається особливо вразливим до корозійно-механічного руйнування (рис. 5). Низка досліджень вказу-

ють і на його високу чутливість до експлуатаційної деградації [6, 7]. Однак, розглядаючи роль корозивного середовища в таких процесах, необхідно враховувати і різну електрохімічну активність металу різних зон зварного з'єднання, що зумовлює виникнення гальванопар. Їх робота впливає на електрохімічні процеси, в тому числі і на наводнювання металу стінки труби, а це вже відбивається і на інтенсивності його деградації [8].

Наведені на рис. 5а корозійно-механічні тріщини зароджені з боку зовнішньої поверхні та локалізовані в зоні термічного впливу осьового зварного шва. Це є свідченням того, що металу цієї зони властивий найнижчий опір корозійно-механічному руйнуванню і на стадії зародження, і на стадії поширення тріщини за дії ґрунтового середовища. Зазначимо, що тріщина вздовж осі труби поширюється під дією максимальних розтягувальних напружень від внутрішнього тиску, тому ризик руйнування в такому шві підвищений.

Практика експлуатації магістральних газопроводів вказує і на можливість порушення їх цілісності через корозійно-механічне руйнування металу в зоні кільцевих швів (рис. 5б), незважаючи на низький рівень осьових напружень у трубі. За правило, тріщини зароджуються від дефектів зварювального походження, однак в подальшому вони поширюються в колдовому напрямі вже за механізмом корозійно-механічного руйнування. А це можливо лише за інтенсивної деградації металу зварного з'єднання, враховуючи незначний рівень осьо-

вих напружень. У наведеному прикладі тріщина, що зародилася з боку внутрішньої поверхні від непровару, поширювалася навпроти нього в зварному шві. Однак в подальшому при входженні в зону бездефектного шва вона переорієнтовувалася у зону термічного впливу, що теж вказує на нижчий опір металу цієї зони корозійно-механічному руйнуванню, хоч агресивним середовищем тут слугує вже транспортований газ. Фактично найвразливіша до руйнування ділянка зварного з'єднання визначається конкурентним деструктивним впливом концентрації напружень (зварний шов) та експлуатаційної деградації металу (зона термічного впливу).

### Макророзшарування труб

У низці випадків, а саме, при виході з компресорних станцій [9], а також на лінійній наземній ділянці магістрального газопроводу (рис. 6), виявлено макророзшарування всередині труб, яке тривалий час експлуатації може не порушувати їх герметичності. Це явище пов'язане з металургійними особливостями отримання труб чи листового прокату, з якого їх виготовляють, та додатково свідчить про особливо важливу роль водню у процесах їх руйнування за специфічним механізмом (рис. 7): інтенсивне наводнювання атомарним воднем металу з боку внутрішньої поверхні (транспортований газ слугує потужним джерелом наводнювання); дифузія атомарного водню в напрямі до зовнішньої поверхні; рекомбінація атомарного водню в молекулярний в дефектах на межі “матриця – неметалеві включення” з утворенням високих тисків, співмірних з руйнівними; поширення процесу руйнування на макрорівні між волокнами прокату через характерну структуру вальцьованого металу з витягнутими ланцюжками неметалевих включень.



Рисунок 6 – Наземна ділянка лінійної частини магістрального газопроводу з виявленим макророзшаруванням

Макродефект може залягати ближче як до зовнішньої, так і внутрішньої поверхні труби, що відбиває конкурентність двох експлуатаційних чинників: робочих напружень і наводнювання металу з боку внутрішньої поверхні. Складність аналізу таких дефектів з огляду на можливе порушення цілісності трубопроводу полягає у необхідності визначення тиску водню

у порожнині розшарування, розрахунку руйнівного тиску транспортowanego газу з урахуванням тиску водню в макродефекті та визначенні таких механічних властивостей експлуатованого металу, які би відбивали опірність металу саме до розшарування. Для вирішення останнього аспекту цієї проблеми у праці [9] запропоновано використовувати радіальні стосовно перерізу труби циліндричні зразки на розтяг спеціальної геометрії (укорочені з концентратором напружень порівняно значного радіусу, роль якого в локалізації деформування та руйнування), довжина яких обмежена товщиною стінки труби. Саме такі зразки виявилися ефективними в оцінюванні опірності експлуатованої труби макророзшаруванню.

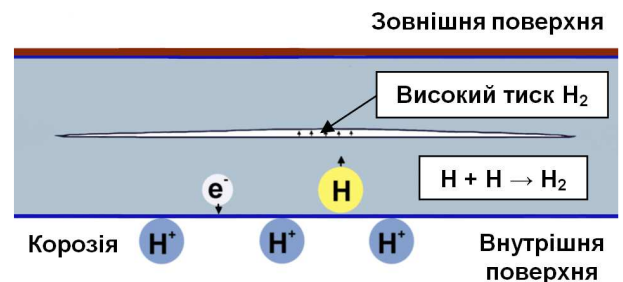


Рисунок 7 – Схема утворення макророзшарування у стінці труби, спричиненого воднем

Узагальнення умов експлуатації трубопроводів у проаналізованих випадках дає підстави вважати, що саме в наземній частині трубопроводу через кліматичні зміни температури створюються сприятливі умови для конденсації вологи на внутрішній поверхні труби, яка завдяки перебігу корозійного процесу слугує джерелом наводнювання металу. Звідси особливо важливо уникати у процесі експлуатації трубопроводів можливості такої конденсації. З іншого боку, важлива і якість металу труб, оскільки з матеріалознавчого погляду, головною причиною розшарування є понижена когезивна міцність неметалевих включень з металевою матрицею, що витягнені вздовж напрямку вальцювання.

### Висновки

Розглянуто низку принципів випадків особливої ролі експлуатаційної деградації трубопроводних сталей у порушенні цілісності магістральних газопроводів, а саме:

1) наявність концентраторів напружень може бути ще недостатнім чинником для зародження від них тріщин, однак експлуатаційне окрихчення підвищує чутливість металу до концентрації напружень і, відповідно, посилює таку можливість;

2) ріст корозійно-механічних тріщин у трубі можливий лише за певного рівня експлуатаційної деградації металу, коли він стає чутливим до такого типу руйнування, при цьому його наводнювання з боку внутрішньої поверхні інтенсифікує процес деградації і, відповідно, руйнування, незалежно від того, з якого боку стінки труби зародилася тріщина;

3) тривало експлуатований метал зварних кільцевих швів виявляє чутливість до корозійно-механічного руйнування попри низький рівень осьових напружень, що зумовлено інтенсивною деградацією сталі;

4) експлуатаційна деградація металу може спричинити макророзшарування труб, особливо наземних ділянок трубопроводів, що пов'язане з накопиченням у порожнинах водню високого тиску через рекомбінацію атомарного водню в молекулярний.

*Дослідження частково підтримане проектом G5055 за програмою НАТО "Наука заради миру та безпеки".*

### **Література**

1 Крижанівський Є. І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: навч.-техн. посібник в 3-х томах // Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2012. – 433 с.

2 Крижанівський Є. І. Деградація матеріалів нафтогазових об'єктів довготривалої експлуатації та шляхи забезпечення їх працездатності / Є. І. Крижанівський // Розроблення родовищ: зб. наук. праць. – 2014. – С. 241-253.

3 Вплив експлуатації сталі Х52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 5. – С. 29–37.

4 Zapffe C. A. Hydrogen embrittlement, interior stress and defects in steel / C. A. Zapffe, C. E. Sims // Trans. AIME. – 1941. – Vol. 145. – P. 225–261.

5 Андрейків О. Є. Механіка руйнування і довговічність матеріалів у водневмісних середовищах / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара. – К.: Наук. думка, 2008. – 345 с.

6 Krasowsky A. Y. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation / A. Y. Krasowsky, A. A. Dolgiy, V. M. Torop // Proc. "Charpy Centenary Conference", Poitiers. – 2001. – Vol. 1. – P. 489–495.

7 Работоспособность трубопроводов. Спротивляемость разрушению // Г. А. Ланчаков, Е. Е. Зорин, Ю. И. Пашков [та ін.]. – Ч. 2. – М.: Недра, 2001. – 350 с.

8 Цирульник О. Т. Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 5. – С. 55–59.

9 Діагностичні ознаки розшарування в стінці відвідних від компресорної станції труб газотранспортної системи / О. І. Звірко, С. Ф. Савула, О. Є. Кунта [та ін.] // Нафтогазова енергетика. – 2016. – № 1 (25). – С. 38–43.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
30.10.16*

*Рекомендована до друку  
професором **Петриною Д.Ю.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Дмитрахом І.М.***

*(Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка  
НАН України, м. Львів)*