

УДК 622.692.4

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ СТІНКИ ТРУБИ ГАЗОПРОВІДІВ

Т. І. Марко, Я. В. Дорошенко

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (3422) 4-21-57; e-mail: snp@nung.edu.ua*

Розглянуто основні механізми ерозійного зношування металевої поверхні твердими частинками. Наведено схеми механізму ерозійного зношування.

Здійснено аналіз чинників, за якими розрізняють тип ерозійного зношування. Встановлено, що найважливішими з усіх чинників є швидкість частинок, кут атаки та інтенсивність зіткнення частинок із стінкою трубопроводу, саме вони найчастіше зустрічаються у всіх моделях ерозійного зношування.

Побудовано залежності швидкості ерозійного зношування від кута атаки для пластичних та крихких матеріалів.

Розглянуто вплив зміни температури на механізм і швидкість ерозійного зношування. Встановлено, що із збільшенням температури матеріал пом'якшуватиметься, а, отже, зростатиме швидкість ерозійного зношування.

Здійснено аналіз впливу режиму течії продукту на ерозійне зношування стінки труби. Встановлено, що при турбулентному режимі течії продукту частинки можуть неодноразово контактувати з поверхнею. Натомість при ламінарному режимі течії частинки переважно рухаються разом із потоком і можуть не пошкоджувати поверхню, що зменшує швидкість ерозійного зношування.

Ключові слова: *кут атаки, швидкість ерозійного зношування, ламінарний режим, турбулентний режим, поверхнева втома, пластичне деформування, крихке руйнування.*

Вступ. Газотранспортна система України складається з газопроводів, термін експлуатації більшості з яких перевищує 40 років. Елементами газотранспортної системи, де в найбільшій мірі відбувається ерозійне зношування стінки труби, є відводи (криві гарячого гнuttя), криві холодного гнuttя, трійники, перехідники різної форми. У всіх цих елементах потік продукту змінює свій напрям і відбувається значне ерозійне зношування стінки труби. Ерозійне зношування є одним з чинників, які зменшують залишковий ресурс фасонних елементів газопроводів. У сучасних умовах старіння газотранспортної системи України, величина ерозійного зношування фасонних елементів може складати бі-

льше 10 мм. Тому для запобігання значних втрат, що можуть бути зумовлені аваріями, необхідна належна та своєчасна оцінка технічного стану фасонних елементів газопроводів, а для цього необхідно визначити механізм ерозійного зношування.

Ерозія металевих поверхонь є однією з основних проблем, яка зустрічається в трубопроводному транспорті. Це фізичне явище, яке виникає в результаті механічного контакту між рухомою частинкою та поверхнею металу, що, у свою чергу, призводить до можливих втрат металу. Ерозія поверхні металу, спричинена впливом твердих частинок, називається ерозією твердими частинками. У деяких випадках ерозійне зношування твердими частинками є корисним, наприклад, піскоструменеве, шротоструменеве очищення, проте це серйозна проблема в трубопроводному транспорті. Ерозія твердими частинками може відбуватися як у газопроводах, так і нафтопроводах. У газовому середовищі вона зустрічається частіше, ніж у рідкому. Причинами наявності твердих частинок у внутрішній порожнині газопроводів є хімічна реакція між матеріалом трубопроводу і забрудненнями, які містяться у внутрішній порожнині трубопроводу. Найчастіше такими забрудненнями є суміш піску, окалини, молекулярні та кристалічні структури сірки та заліза, які є продуктами кородування внутрішньої поверхні трубопроводів.

До ерозійного зношування стінки труби трубопроводів також може призводити наявність вологи у транспортованому газі, яка накопичується на понижених ділянках траси.

Формулювання завдань дослідження. Завданням дослідження є визначення впливу різних чинників на механізм ерозійного зношування, вивчення механізму ерозійного зношування стінки труби газопроводів, побудова залежностей між чинниками ерозії та швидкістю ерозійного зношування, аналіз траєкторії руху частинок при різних режимах течії продукту, розроблення методики розрахунку, яка дасть можливість визначити швидкість ерозійного зношування.

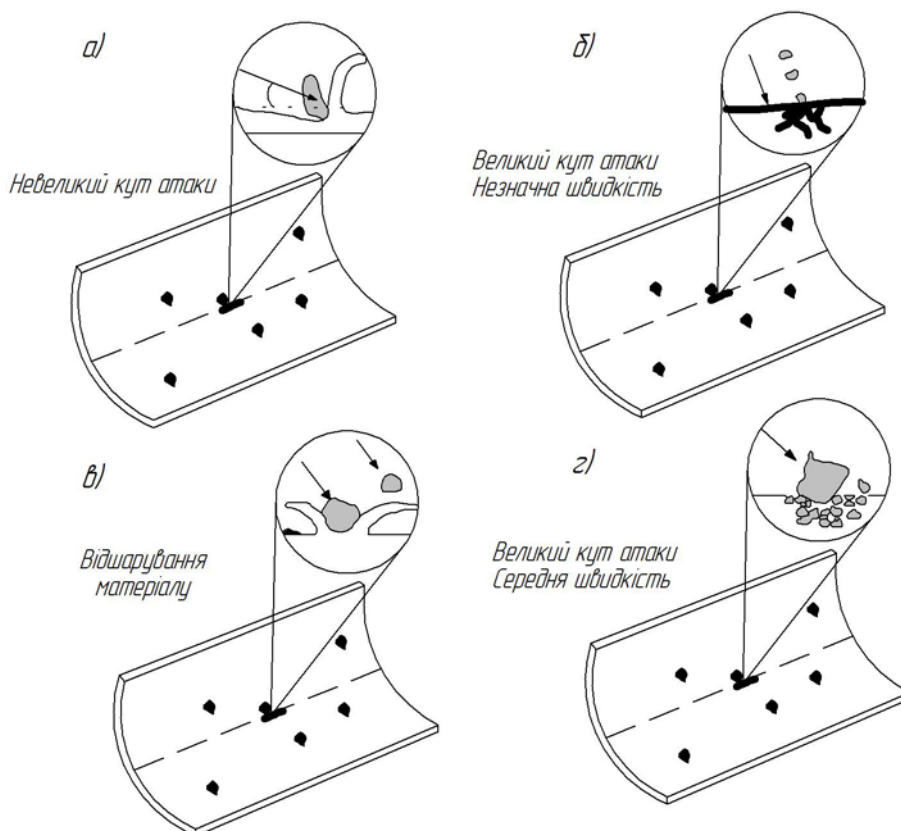
Виклад основного матеріалу. Зношування стінки труби, спричинене ерозією, є одним з багатьох видів зношування. На сьогодні в літературі можна зустріти багато різних теорій, які описують механізм ерозійного зношування. Тому дуже важливо мати загальне розуміння про дане явище, його види та механізми. Важко сформулювати точне і зрозуміле визначення ерозійного зношування. Переважна більшість визначень говорить, що це втрата або пошкодження матеріалу зумовлене механічною взаємодією між компонентами. Ерозійне зношування визначається як пошкодження твердої поверхні з втратою матеріалу, спричинене зіткненням твердих або рідких частинок, які рухаються з великою швидкістю, з стінкою трубопроводу. Ці частинки містяться в продукті, який транспортується, і мають достатню кінетичну енергію, щоб пошкодити металеву поверхню. Ерозійне зношування поділяється

на зношування зумовлене твердими частинками та зношування зумовлене краплями рідини.

Повністю усунути ерозійне зношування стінки труби газопроводів не можливо, але детальне вивчення механізму ерозійного зношування дасть змогу краще зрозуміти механізм руйнування матеріалу, що допоможе звести до мінімуму величину ерозійного зношування стінки труби.

Г. Стейчвейк і А. Бетчелор в 1993 році виділили сім різних можливих механізмів ерозійного зношування твердими частинками: абразивна ерозія, поверхнева втома, пластичне деформування, крихке руйнування, макроскопічна і атомна ерозія [1].

Якщо кут атаки є невеликим, а тверда частинка врізається в поверхню (рис. 1,а), то даний механізм ерозійного зношування називається абразивною ерозією. Під час взаємодії з поверхнею абразивні частинки ковзають нею, зумовлюючи ерозійне зношування в результаті тертя і різання матеріалу.



а – механізм абразивної ерозії; б – поверхнева втома;

в – пластичне деформування поверхні; г – крихке руйнування

Рис. 1. Схематичне зображення ерозійного зношування металеві поверхні

Поверхнева втома відбувається коли частинка вдаряється в стінку трубопроводу під великим кутом атаки, але на незначній швидкості (рис. 1,б). Поверхня стає слабкою через дію втоми і після повторного удару виникають тріщини.

Пластичне деформування поверхні відбувається у разі ударяння частинок навколо місця ударяння попередніх частинок. Частинки ударяються в пружну поверхню з середньою швидкістю і великим кутом атаки (рис. 1,в). Під час повторного ударяння відбувається відшарування матеріалу.

Крихке руйнування відбувається при великому куті атаки і середній швидкості зіткнення частинок з поверхнею (рис. 1,г).

У 1973 році Г. Тіллі був запропонований двоступеневий механізм ерозії. Згідно його досліджень, перший етап проявляється, коли частинка потрапляє на поверхню і утворює вм'ятину з можливим відшаруванням поверхні стінки. Другий етап відбувається, коли частинка розпадається і її фрагменти розлітаються від місця пошкодження. Ці фрагменти можуть спричинити вторинне пошкодження [2].

Є декілька чинників, які визначають тип ерозійного зношування (рис. 2). Ці чинники можна поділити на:

- умови експлуатації – швидкість частинок, кут атаки, швидкість потоку, температура, інтенсивність зіткнення частинок з стінкою трубопроводу;
- характеристики частинок – тверді чи рідкі, розмір, форма, твердість, матеріал;
- характеристики стінки труби – хімічний склад, твердість.

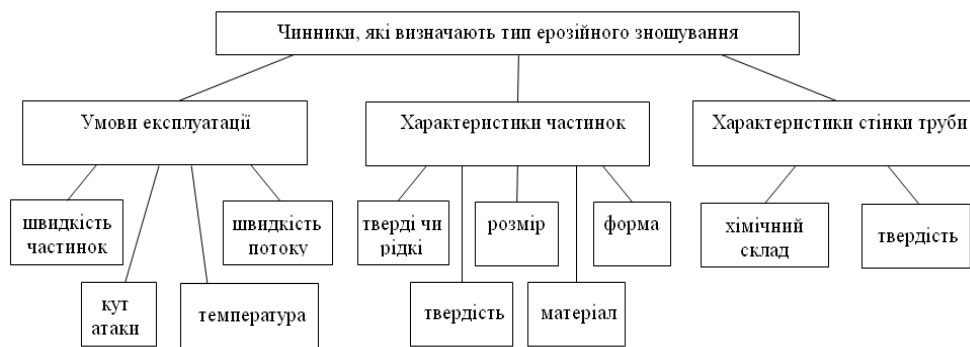


Рис. 2. Чинники, які визначають тип ерозійного зношування

Значний вплив на швидкість ерозійного зношування також мають характеристики транспортованого продукту. На швидкість ерозійного зношування впливають наступні параметри:

- характеристики продукту: густина, в'язкість;
- режим течії: ламінарний, турбулентний;

- мікроскопічні властивості поверхні, корозійна активність, мас-тильний ефект.

Для розуміння впливу вищенаведених чинників на величину ерозійного зношування стінки труби доцільно розглянути вплив кожного з них окремо. Найважливішими з усіх чинників є швидкість частинок, кут атаки та інтенсивність зіткнення частинок із стінкою трубопроводу. Вони найчастіше зустрічаються у всіх моделях ерозійного зношування.

Кут атаки визначається як кут між стінкою трубопроводу і траєкторією руху частинки безпосередньо перед зіткненням з стінкою трубопроводу. Якщо частинки рухаються паралельно поверхні, то кут атаки становить майже 0° , що призведе тільки до незначного зношування стінки трубопроводу. Кут атаки складає 90° , якщо частинки рухаються нормально до поверхні. Швидкість та механізм ерозійного зношування пластичних і крихких матеріалів є різними і вони залежать від кута атаки. Пластичні матеріали зазнають сильнішого ерозійного зношування при меншому куті атаки. Максимальна швидкість ерозії пластичних матеріалів спостерігається при куті атаки в межах від 10° до 30° . В крихких матеріалах швидкість ерозійного зношування зростає з збільшенням кута атаки і є максимальною при куті атаки 90° . Якщо максимальна швидкість ерозійного зношування спостерігається при малому куті атаки то ерозійне зношування можна називати пластичним деформуванням. Якщо ж максимальна швидкість ерозії спостерігається при куті атаки 90° , незалежно від матеріалу поверхні, то ерозійне зношування можна назвати крихким руйнуванням.

Залежність швидкості ерозійного зношування від кута атаки для пластичного і крихкого матеріалів наведена на рис. 3. Вважається, що потік частинок в прямій трубі має нульовий кут атаки, проте навіть у такому випадку можна очікувати незначне ерозійне зношування стінки труби. У турбулентному потоці, частинки можуть хаотично рухатись у внутрішній порожнині трубопроводу навіть у напрямку, перпендикулярному потоку, що призводить до того, що кут атаки може складати 90° .

Пластичне деформування і різання поверхні відбувається одночасно і співвідношення цих механізмів ерозійного зношування залежить від швидкості частинки і кута атаки та інших параметрів. Поки частинка не досягне критичної швидкості, вона не ковзатиме поверхнею і не пошкодить її. Коли швидкість частинки перевищує критичну, пошкодження поверхні і пластичне деформування зростає, що призводить до зростання швидкості ерозійного зношування. Режим ерозійного зношування також змінюється залежно від швидкості частинок. При низьких швидкостях частинки не мають достатньої енергії, щоб різати матеріал, але може спостерігатися пружна деформація або ефект втоми. Найчастіше швидкість частинок вважається такою ж як і швидкість потоку в трубопроводі. Проте на практиці це не зовсім вірно, оскільки, як правило, швидкість частинок менша ніж швидкість потоку. Точність визна-

чення швидкості частинок в потоці має важливе значення в моделі ерозійного зношування, але на практиці її важко визначити. Швидкість частинок в продукті можна визначити розв'язавши рівняння безперервності руху.

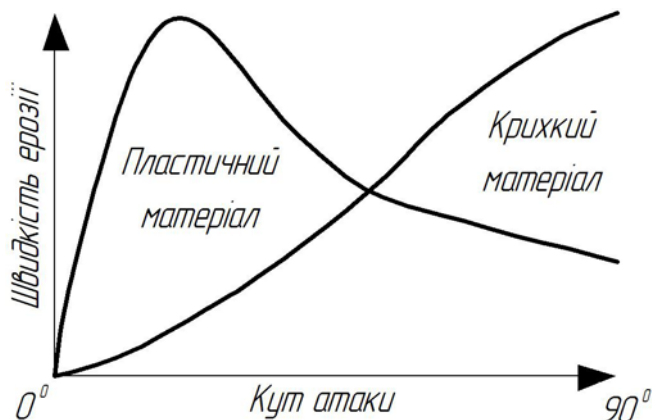


Рис. 3. Залежність швидкості ерозійного зношування від кута атаки для пластичних та крихких матеріалів

Для опису механізму ерозійного зношування часто використовують поняття концентрації частинок – маса (або об'єм) частинок у одиниці маси (або об'єму) продукту. Інтенсивність зіткнення частинок з стінкою трубопроводу визначається їх концентрацією у внутрішній порожнині трубопроводу та швидкістю продукту. Швидкість ерозійного зношування прямо-пропорційна швидкості продукту та концентрації частинок. Особливо це є справедливим для великого кута атаки.

На механізм і швидкість ерозійного зношування також впливає зміна температури. Із збільшенням температури матеріал пом'якшуватиметься, а, отже, зростатиме швидкість ерозії. Коли температура перевищує граничну, швидкість ерозії суттєво зростає.

Схематична залежність ерозійного зношування від температури наведена на рис. 4.

Вплив в'язкості продукту на швидкість ерозійного зношування полягає у тому, що в'язкість продукту надає частинкам силу опору, впливаючи на швидкість ерозійного зношування зміною кута атаки.

Комплексним аналізом траєкторії руху частинок можна визначити швидкість ерозійного зношування і місця пошкодження стінки труби. Траєкторія частинок залежить від умов транспортованого середовища. Якщо напрямок потоку паралельний поверхні, але режим течії турбулентний, то швидкість ерозійного зношування матеріалу вища порівняно з ламінарним режимом течії. Якщо режим течії турбулентний то в контакт з поверхнею вступає більша кількість частинок і ті ж частинки

можуть багаторазово вдарятися в поверхню. Якщо режим течії ламінарний частинки переважно рухаються разом із потоком і можуть переміщуватись без пошкодження поверхні, що зменшує швидкість ерозійного зношування. Коли потік продукту спрямований по нормалі до поверхні, то швидкість ерозійного зношування буде вищою для ламінарного режиму течії, ніж для турбулентного. Поведінку частинок при ламінарному і турбулентному режимах течії наведено на рис. 5.

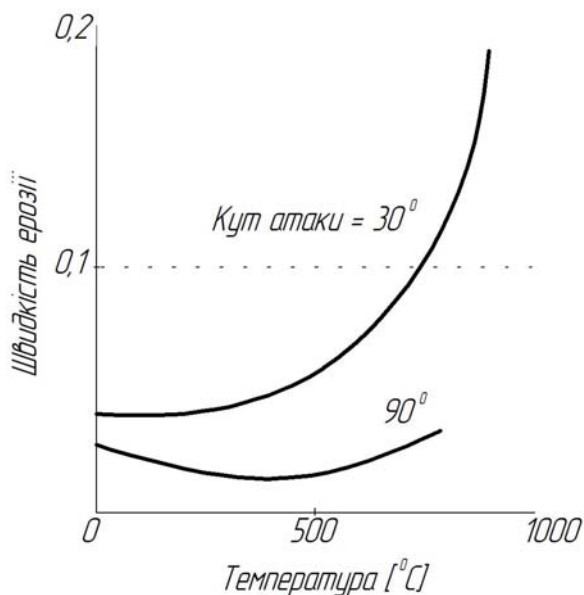
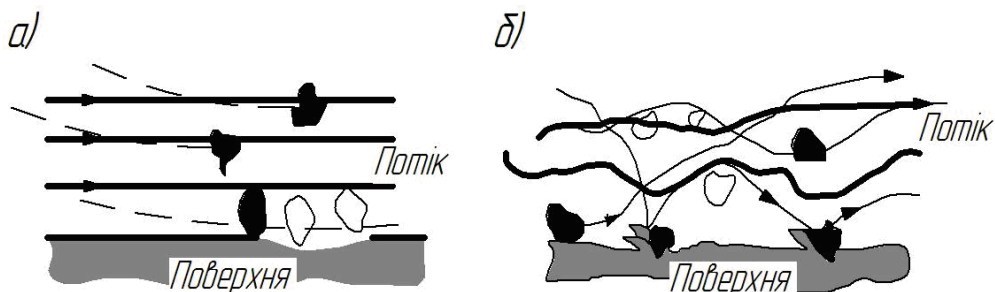


Рис. 4. Схематична залежність швидкість ерозійного зношування від температури



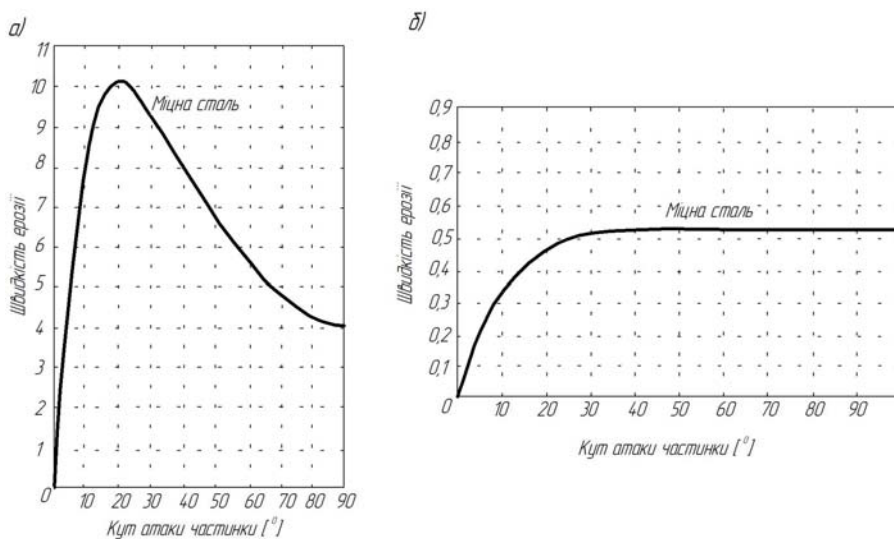
а – ламінарний потік; б – турбулентний потік

Рис. 5. Схематичне зображення впливу режиму течії продукту на ерозійне зношування стінки труби

Крім властивостей транспортованого середовища на механізм та швидкість ерозійного зношування також впливають характеристики частинок. Характеристики частинок можуть залишатися не змінними, або ж змінюватися залежно від умов експлуатації. Знання характерис-

тик частинок відіграє значну роль для оцінки, зменшення та запобігання ерозійному зношуванню.

Характеристики частинок, в основному, описуються двома параметрами – масою і довжиною. Для заданої швидкості частинки, кінетична енергія частинки прямо-пропорційна масі, а маса сферичної частинки пропорційна діаметру в третій степені. Таким чином, швидкість ерозійного зношування пропорційна діаметру частинок в третій степені. Г. Шелдон, І. Фінні [3] спостерігали зміну ерозійного зношування від пластичного режиму до крихкого, коли розмір частинок змінювався від малого до великого. Частинки меншого розміру мають більший ріжучий вплив, тоді як частинки більшого розміру деформують матеріал пружною деформацією і втому. Із зміною режиму ерозійного зношування, відбувається різка зміна швидкості і опору ерозійному зношуванню, як показано на рис. 6.



а – малі частинки; б – великі частинки

Рис. 6. Залежність швидкості ерозійного зношування від розміру частинок та кута атаки для міцної сталі

Форма частинок також є одним з важливих параметрів, від яких залежить швидкість ерозійного зношування, але залежність між швидкістю ерозійного зношування і формою частинок досліджена не повністю. Форми частинок визначаються візуальним спостереженням і можуть бути круглі, кутові і півкруглі. Форма частинки в значній мірі впливає на інтенсивність ерозійного зношування стінки труби, наприклад, неправильна форма з гострими краями збільшує швидкість ерозійного зношування, в той час як заокруглені частки призупиняють її. Більшість моделей ерозійного зношування враховують вплив форми частинок. Фактично форма частинки визначає площу контакту між частинкою і поверхнею металу під час зіткнення.

Форма і твердість частинок залежать один від одного. Тверді частинки мають гострий профіль, а краї м'якої частинки округлюються навіть при легкому натисканні. Якщо частинка твердіша за матеріал стінки, то відбувається сильне ерозійне зношування, але якщо частинка є більш м'якшою, то ерозійне зношування відбувається тільки тоді, коли матеріал стінки має низьку в'язкість руйнування. Таким чином, співвідношення твердості частинки і матеріалу стінки має значний вплив на швидкість ерозійного зношування.

У 1958 році І. Фінні [4] запропонував модель ерозійного зношування, отриману аналізом рівнянь руху однієї частинки під час її зіткнення з пластичною поверхнею. Для оцінки обсягу втрати матеріалу поверхні зумовленої зіткненням з нею частинки, була досліджена траєкторія руху частинки. При цьому було прийнято наступні припущення:

- прорізання поверхні є пластичною деформацією;
- тріщини не поширюються попереду частинки, яка ріже поверхню;
- відшарування матеріалу спричинене ріжучою дією абразивних частинок.

Проте даний метод не можливо застосовувати для крихких матеріалів. Схематичне зображення механізму різання твердої поверхні частинкою, яка з великою швидкістю врізається в неї наведено на рис. 7.

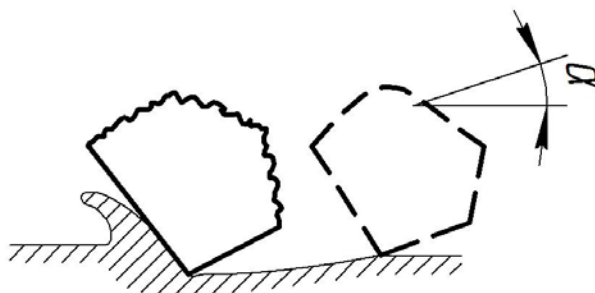


Рис. 7. Схематичне зображення механізму різання твердої поверхні частинкою, яка з великою швидкістю врізається в неї

Модель ерозійного зношування твердої поверхні І. Фінні має вигляд

$$w = \frac{\rho \cdot m \cdot V^2}{\rho \cdot \psi \cdot K} \cdot F(\alpha), \tag{1}$$

$$F(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{\sin 2\alpha} - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha & \tan(\alpha) < \frac{k}{6} \\ \frac{K}{6} \cos^2 \alpha & \tan(\alpha) < \frac{k}{6} \end{cases}, \tag{2}$$

де w – маса відшарованого матеріалу поверхні після удару однієї частинки; ρ – густина матеріалу поверхні; m – маса частинки, яка удара-

ється в поверхню; p – горизонтальна складова пластичного напруження (приблизно рівна твердості матеріалу за Віккерсом); K – параметр співвідношення вертикальної та горизонтальної складових сил, які діють на частинку (постійний протягом усього процесу різання), приймає значення 1,6-6 і вище; Ψ – відношення довжини лінії контакту частинок з поверхнею до глибини порізу, спричиненого частинками (параметр постійний протягом усього процесу різання), приймає значення від 2 до 10.

За результатами спостережень І. Фінні зробив висновок, що тільки передній край абразивних частинок контактує з поверхнею під час зіткнення з нею [5-6].

Критерієм пошкодження матеріалу, коли максимальна пластична деформація досягає критичного значення, І. Хатчінгсом була запропонована “критична деформація” ε_k [7]. Зображення енергетичного балансу для одного удару частинки показано на рис. 8.

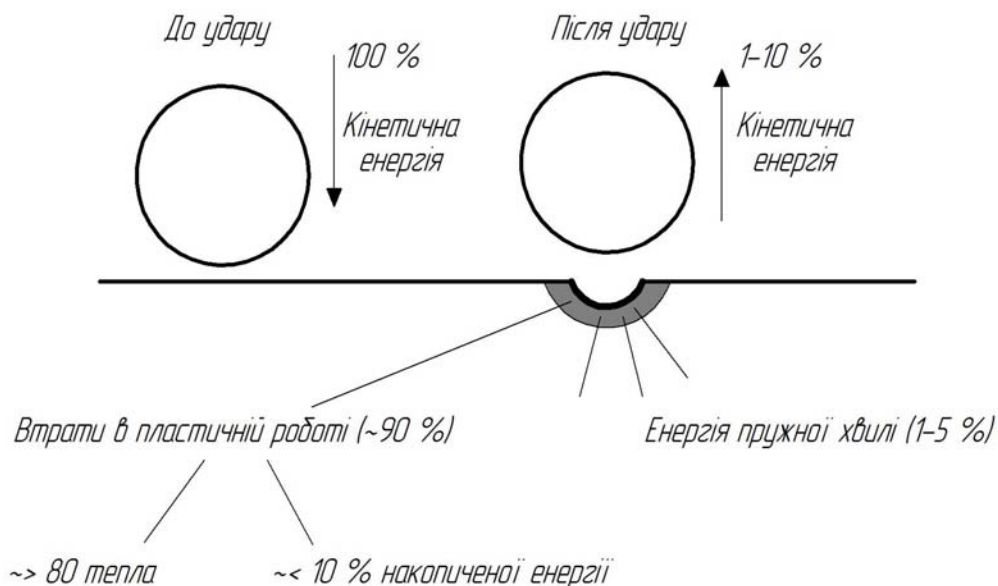


Рис. 8. Енергетичний баланс для одного удару частинки

Кінетична енергія частинки

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (3)$$

де v – швидкість частинки.

Вважається, що металева поверхня протистоятиме утворенню вм'ятин постійним тиском P . Пружними силами знехтуємо. Аналіз енергетичного балансу під час удару показав, що найменше 90 % від початкової кінетичної енергії частинки витрачається на пластичну деформацію металу, що підтверджує доцільність нехтування пружними си-

лами. На рис. 9 показано розподіл кінетичної енергії частинки після взаємодії з металевою поверхнею. Якщо припустити, що уся кінетична енергія частинки може спричинити вм'ятину, то величина її становитиме

$$V = \frac{mv^2}{2P}. \quad (4)$$

За формулою (4) можна визначати вплив ерозійних частинок будь-якої форми на металеву поверхню за умови, що частинка не пошкоджується і не деформується. При цьому нехтується пружними силами. Після n_c зіткнень, об'ємна витрата на один удар складатиме

$$\gamma = \frac{\alpha m v^2}{2P n_c}, \quad (5)$$

де коефіцієнт α можна визначити прирівнявши початкову кінетичну енергію ударної частинки з роботою, виконаною при утворення вм'ятин

$$\alpha = 2^{\frac{1}{2}} r v^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2\sigma}{3P} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

де r – радіус сферичної частинки; σ – густина частинки.

Якщо металева поверхня має густину ρ , то ерозія E визначається як співвідношення втрати маси металу на одиницю маси атакуючих частинок

$$E = \frac{\alpha \rho v^2}{2P n_c}. \quad (7)$$

Із вищенаведених рівнянь (1-7) ерозія визначається як

$$E = 0,033 \frac{\alpha \rho \sigma^{\frac{1}{2}} v^3}{\varepsilon_k^2 P^{\frac{3}{2}}}. \quad (8)$$

Висновок. Встановлено, що на механізм ерозійного зношування стінки труби газопроводів впливає ряд наступних чинників: умови експлуатації, характеристики частинок, характеристики стінки труби. Побудовано залежності швидкості ерозії від кожного із вище наведених чинників, що дає можливість наглядно ознайомитися і проаналізувати вплив умов експлуатації, характеристик частинок та стінки труби на величину ерозійного зношування. Показано поведінку ерозійних частинок при різних режимах течії. Аналітичним дослідженням динаміки впливу частинок на поверхню стінки газопроводу показана можливість прогнозування швидкості ерозійного зношування. Результати розрахунків дадуть змогу об'єктивно оцінити вплив окремої частинки на швидкість ерозійного зношування.

Література

- 1 Stachowiak G.W. Engineering Tribology / G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor // Amsterdam. – 1993.
- 2 Tilly G.P. Erosion caused by impact of solid particles / G.P. Tilly // Material Science Technology. – 1979. – №13. – P. 287-319.
- 3 Sheldon G.L. On the ductile behavior of nominally brittle material during erosive cutting / G.L. Sheldon, I. Finnie // Transaction of ASME (88B). – 1966. – P. 387-392.
- 4 Finnie I. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals / I. Finnie // Proceedings of 3 rd US National Congress of Applied Mechanics. – 1958. – P. 527-532.
- 5 Finnie I. Erosion of surfaces by solid particle / I. Finnie // Wear (3). – 1960. – P. 87-103.
- 6 Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion / I. Finnie // Wear (186-187). – 1995. – P. 1-10.
- 7 Hutchings I.M., Winter R.E. Particle Erosion of Ductile Metals: A Mechanism of Material Removal / I.M. Hutchings, R.E. Winter // Wear. – 1974. – Vol. 27. – P. 121-128.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 26.05.2015 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.,
д.т.н., професором Тимківим Д.Ф.*

**STUDY OF THE EROSIIVE WEAR MECHANISM
OF THE PIPELINE WALL****T. I. Marko, Ya. V. Doroshenko**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Carpats'ka st., 15;
ph. +380 (3422) 4-21-57; e-mail: snp@nung.edu.ua*

The erosive wear basic mechanisms of the surface by solid particles, was studied. It was determined their influence on the metal surface. The formation mechanism schemes of erosion, was studied.

The analysis of the factors, which distinguish the type of erosive wear, was carried out. It was determined that the most important factor of all are the velocity of the particles, impact angle and the intensity of the collision of particles with the wall of the pipeline, they are most often found in all models of erosive wear.

The dependences of the erosive wear rate to the impact angle for plastic and brittle materials were determined.

The effect of the temperature changes on the mechanism and rate of erosive wear, was studied. It was determined that with increasing of the

temperature the material was plastic, therefore, the erosive rate will increase.

The analysis of the impact of product flow regime to erosive wear of the pipe wall, was carried out. It was determined that the turbulent flow regime particles can repeatedly contact with surface. Instead, in laminar flow regime mainly particles moving with the flow and can go without damaging the surface, which reduces the erosive wear rate.

Key words: *erosion wear, impact angle, the rate of erosive wear, laminar regime, turbulent regime, surface fatigue, plastic deformation, brittle fracture*