

УДК 622.692.4

Р.С. Савула, А.О. Кичма
ОЦІНКА МІЦНОСТІ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВОДІВ В ЗОНАХ ЛОКАЛЬНИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

В статті розглянуто деякі особливості експериментального визначення міцності ділянок трубопроводів в зонах локальних пластичних деформацій. На базі проведених досліджень встановлено граничні значення коерцитивної сили, за яких можлива безпечна експлуатація ділянок трубопроводів з локальними пластичними деформаціями.

Ключові слова: трубопровід, резервуар, пластична деформація, міцність, труба сталь.
Форм. 8. Табл. 4. Рис. 6. Літ. 12.

Р.С. Савула, А.А. Кычма
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ В ЗОНАХ ЛОКАЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

В статье рассмотрено некоторые особенности экспериментального определения прочности участков трубопроводов в зонах локальных пластических деформаций. На базе проведенных опытов установлено граничные значения коэрцитивной силы, при которых возможна безопасная эксплуатация участков трубопроводов с локальными пластическими деформациями.

Ключевые слова: трубопровод, резервуар, пластическая деформация, прочность, трубная сталь.

R.S. Savula, A.O. Kychma
ESTIMATION OF THE STRENGTH OF SEGMENTS OF PIPELINES IN ZONES OF LOCAL PLASTIC DEFORMATION

The paper presents some particularizes of experimental estimation of the strength of segments of pipelines in zones of local plastic deformation. Basing on the investigations, recommendations for engineering practice are suggested.

Keywords: pipeline, reservoir, strength, plastic deformation, pipe steel.

Постановка проблеми. Більшість магістральних трубопроводів України експлуатуються понад 30 років. Згідно нормативних документів [10, 11] трубопроводи термін експлуатації яких більше 20 років необхідно обстежувати, використовуючи внутрішньотрубну діагностику. Внутрішньотрубна діагностика магістральних газопроводів (МГ) тривалої експлуатації часто виявляє ділянки трубопроводів з зонами локальних пластичних деформацій. Такі зони можуть утворитись в процесі будівництва МГ, чи внаслідок силового тиску кам'яної породи на трубопровід на ділянках зсуву [1]. Несуча здатність ділянок, трубопроводів з зонами локальних пластичних деформацій, суттєво зменшується [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення несучої здатності трубопроводів і резервуарів тривалої експлуатації з зонами локальних пластичних деформацій є дуже важливою задачею. Оцінці статичної міцності тонкостінних посудин і циліндричних оболонок приділяється велика увага вітчизняними дослідниками серед яких Б. Кантор [3], Р. Онацкий [6], І. Ориняк [8], В. Розгонюк [7], М. Сухорольський [2] та інші. Оцінка залишкової міцності трубопроводів з дефектами форми типу вм'ятин приведена в працях [7, 8]. Дана задача була вирішена в наближеній постановці. Автори прийняли допущення, що довжина деформованої по колу ділянки труби дорівнювала її початковій недеформованій довжині. Визначення напружено-деформованого стану циліндричних оболонок з вм'ятинами, які утворилися статичним вдавлюванням штампа описана в праці [6], а процес утворення вм'ятини ударом сфери – в праці [3]. У цих працях теоретичні дослідження проведені методом скінченних елементів з врахуванням фізичної і геометричної нелінійності.

Невирішені частини проблеми. Відомий метод [9] експериментального визначення технічного стану циліндричних оболонок на основі визначення коерцитивної сили базується на дослідженнях зразків, які випробували за умов одновісного напруженого стану. Циліндричні оболонки під дією експлуатаційних параметрів знаходяться в стані двовісного напруженого стану.

Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни коерцитивної сили в залежності від напружено-деформованого стану трубопроводу з вм'ятиною в зонах пружних деформацій і максимальних стискаючих та розтягуючих пластичних деформацій за умов двовісного статичного навантаження.

Основні результати досліджень. Для визначення граничного стану металу труби в зоні локальних пластичних деформацій змонтували випробувальний резервуар загальний вид якого

наведений на рис. 1. Резервуар змонтований із котушки 5 з вм'ятиною, кільце 2, 4, 6 і 7, конусного перехідника 3 і двох сферичних днищ 1 і 8. Котушка 5 з зоною локальних пластичних деформацій була виявлена під час внутрішньотрубної діагностики діючого МГ "Івацевичі-Долина". Для закріплення арматури, по якій подається вода був приварений спеціальний патрубок 9, а для стравлення повітря встановлений штуцер з пробкою 10 (див. рис. 1). Геометричні характеристики складових випробувального резервуара і марки сталей, з яких вони виготовлені наведені в табл. 1, а механічні характеристики їх матеріалів – в табл. 2.

Якість зварних з'єднань перевірялась візуальним контролем і за допомогою рентгеноскопії та ультразвукової дефектоскопії. Випробувальний 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. Продувочний агрегат дозволяв створювати надлишковий тиск у резервуарі до 30 МПа.

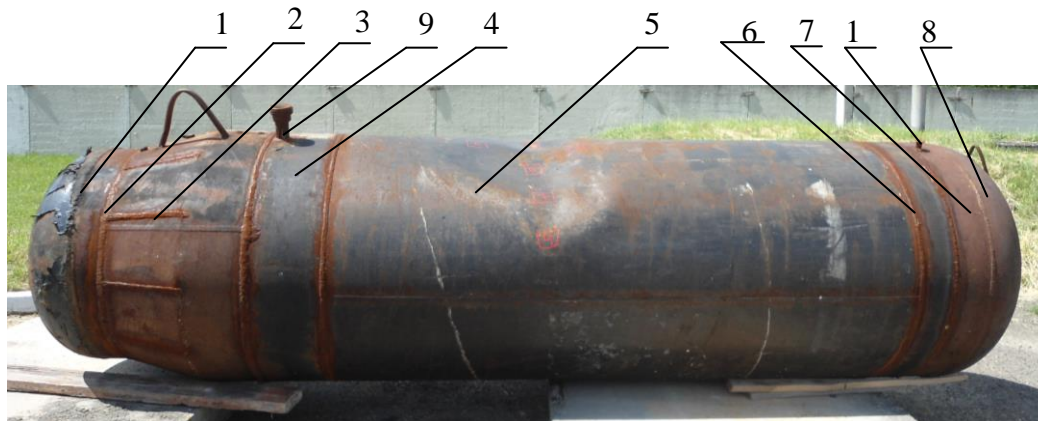


Рис. 1. Загальний вигляд випробувального резервуара

Таблиця 1. Геометричні характеристики і марки сталі складових резервуара

№ %	Зовнішній діаметр D_3 , мм	Довжина котушки l , мм	Товщина стінки δ , мм	Форма	Марка сталі
1	1020	200	22	півсферичне днище	09Г2С
2	1020	250	18	перехідне кільце	17Г1С
3	1020/1220	700	16	конусний перехідник	17Г1С
4	1220	400	14	перехідне кільце	17Г1С
5	1220	2430	12	циліндрична котушка	17Г1С
6	1220	300	16	перехідне кільце	17Г1С
7	1220	250	18	перехідне кільце	17Г1С
8	1220	250	22	півсферичне днище	09Г2С

Таблиця 2. Основні механічні характеристики матеріалу складових резервуара

№ складового резервуара	Марка сталі	Границі міцності, МПа	Границі текучості, МПа	Відносне довження, %	Ударна в'язкість основного металу, КСV, Дж/см ²	Ударна в'язкість зварного з'єднання, КСV, Дж/см ²	Доля зкої складової зломі зразків DWTT, %
1;8	09Г2С	520	340	22	61	29,0	81
3;6	17Г1С	570	400	24	58	51	89
5	17Г1С	580	410	25	47	42	87
2;4;7	17Г1С	575	360	23,5	48	39	83

Зварювання замикаючого 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 .

Розглянутий випробувальний резервуар представляє собою тонкостінну осесиметричну оболонку, в якій присутні головні напруження кільцеві σ_{κ} і осьові σ_{oc} . Третє головне напруження направлено нормально до поверхні резервуара, максимальне значення якого рівне силі тиску p в резервуарі. В тонкостінних резервуарах завжди кільцеві σ_{κ} і осьові σ_{oc} напруження значно більші від p . При цьому кільцеві напруження σ_{κ} вдвоє більші від осьових σ_{oc} .

Величини кільцевих σ_{κ} і осьових σ_{oc} напружень від внутрішнього тиску в котушках резервуара обчислювались за відомими формулами

$$\sigma_{\kappa} = \frac{pD_B}{2\delta}; \quad \sigma_{oc} = \frac{pD_B}{4\delta}, \quad (1)$$

де D_B - внутрішній діаметр складових частин резервуара; δ - залишкова товщина їх стінок; p - внутрішній тиск в резервуарі.

Оскільки в газопроводах сила тиску газу на багато менша від кільцевого і осьового напружень в тілі труби, тому рахуємо, що матеріал оболонки знаходиться в плоскому напруженому стані. Еквівалентні напруження визначимо використовуючи теорію Мізеса – Губера

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_{\kappa}^2 - \sigma_{\kappa}\sigma_{oc} + \sigma_{oc}^2}. \quad (2)$$

Результати розрахунків компонентів напружень для котушки 5 зведені в таблицю 3. Результати наведені в табл. 3 пораховані для серединної недеформованої частини котушки 5. Оскільки ті частини резервуара, що примикають до сферичних днищ не відповідають умовам безмоментної теорії оболонок.

Оцінку міцності ділянок трубопроводів в зонах локальних пластичних деформацій проведено за результатами визначення зміни величини коерцитивної сили. Цей метод в останні роки отримав досить широке застосування [4, 9].

Таблиця 3. Результати розрахунків компонентів напружень для серединної недеформованої частини котушки 5

№ п/п	p , МПа	σ_{κ} , (МПа)	σ_{oc} , (МПа)	σ_E , (МПа)	$\frac{\sigma_E}{\sigma_T} \cdot 100\%$	$\frac{\sigma_E}{\sigma_B} \cdot 100\%$
1	1,0	49,8	24,9	43,1	10,5	7,43
2	2,0	99,6	49,8	86,3	21,1	14,9
3	3,0	149,4	74,7	129,4	31,6	22,3
4	4,0	199,2	99,6	172,5	42,1	29,7
5	5,0	249,0	124,5	215,6	52,6	37,2
6	6,0	298,8	149,4	258,8	63,1	44,6
7	7,0	348,6	174,3	301,9	73,6	52,1
8	8,0	398,4	199,2	345,0	84,2	59,5
9	9,0	448,2	224,1	388,2	94,7	66,9
10	10,0	498,0	249,0	431,3	105,2	74,4
11	11,0	547,8	273,9	474,4	115,7	81,8

Визначення коерцитивної сили різних ділянок резервуара проводили за допомогою приладу коерцитиметра КРМ-Ц-К2М, який укомплектований блоком управління 5 і давачем 6 (рис. 2). Форма і розміри зони локальних пластичних деформацій, і місця установки давачів на котушці 5 випробувального резервуара наведені на рис. 3. Значення коерцитивної сили вимірювали після кожного кроку підняття внутрішнього тиску в резервуарі у точках 1-7, що знаходяться в зоні вм'ятини (див. рис.3) і точці 8, що розміщена поза зоною впливу залишкових напружень від

вм'ятини і зварних швів. Вимірювання проводили відповідно в осьовому напрямку, що співпадає з віссю котушки і в кільцевому напрямку, що перпендикулярний до осі котушки.

За результатами експерименту побудували залежності зміни величини коерцитивної сили від внутрішнього тиску у випробувальному резервуарі. На рис. 4 зображені залежності зміни коерцитивної сили від внутрішнього тиску p і еквівалентного напруження σ_E у випробувальному резервуарі для точки 8 (див. рис. 3), 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.

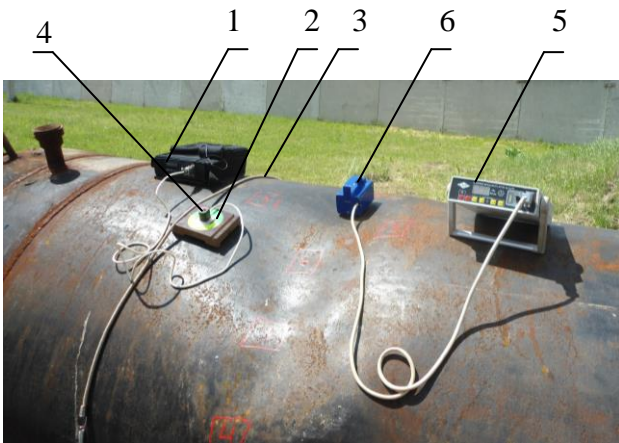


Рис. 2. Визначення напруженого стану ділянок резервуара коерцитиметром КРМ-Ц-К2М

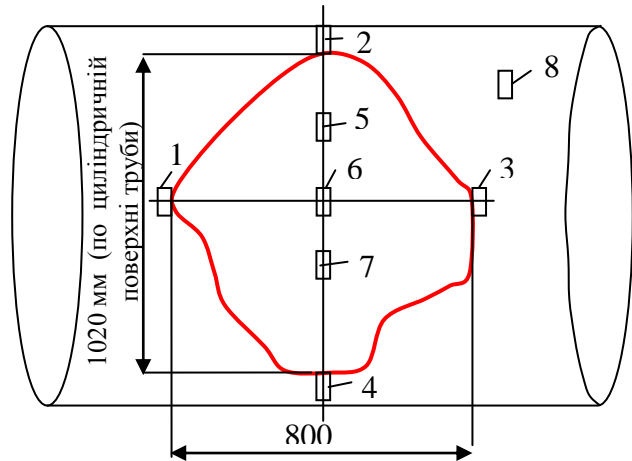


Рис. 3 Форма і розміри зони локальних пластичних деформацій, і місця установки давачів на котушці 5 випробувального резервуара

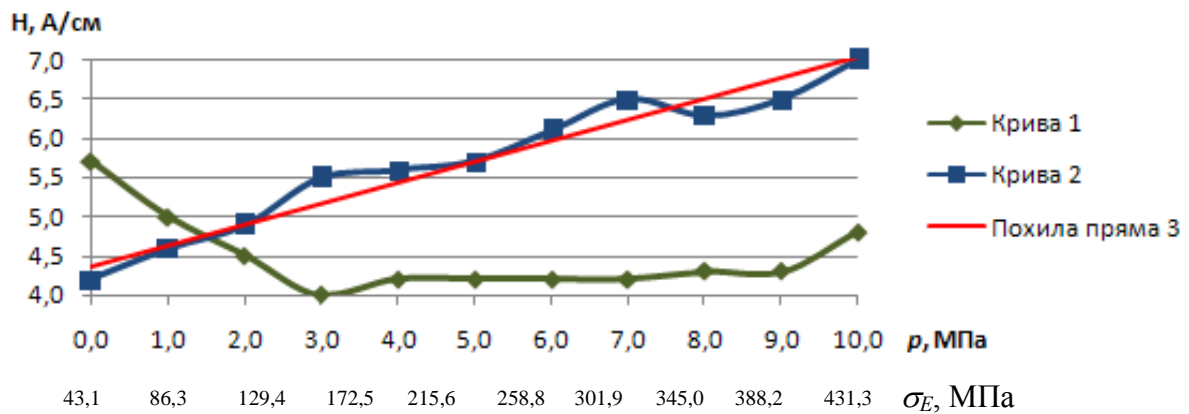


Рис. 4. Залежності зміни коерцитивної сили від внутрішнього тиску p і еквівалентного напруження σ_E в точці 8 випробувального резервуара

На рис. 5 зображені залежності зміни коерцитивної сили в осьовому (крива 1) і кільцевому (крива 2) напрямках, від внутрішнього тиску у випробувальному резервуарі для точки 2 (див. рис. 3), яка розміщена в зоні переходу від розтягуючих до стискаючих волокон металу стінки труби.

На рис. 6 зображені залежності зміни коерцитивної сили в осьовому (крива 1) і кільцевому (крива 2) напрямках, від внутрішнього тиску у випробувальному резервуарі для точки 6 (див. рис. 3), яка розміщена на ділянці вм'ятини з максимальним прогином, що становив 65 мм.

Руйнування випробувального резервуара відбулося на ділянці перетину кільцевого і поздовжнього швів конусного перехідника при досягненні тиску $p = 11,0 \text{ МПа}$. При цьому еквівалентні напруження в серединній пластично деформованій частині котушки 5 досягли значення $\sigma_E = 474,4 \text{ МПа}$, що складає 81,8% від границі міцності.

Для визначення похибки при вимірюванні коерцитивної сили металу трубопроводу, приладом КРМ-Ц-К2М, було проведено наступні дослідження. На котушці 5 (див. рис. 1) випробувального резервуара визначали коерцитивну силу в одній і тій же точці з чотирьох спроб. При цьому отримали наступні значення коерцитивної сили H_{ci} : 7.1, 7.0, 7.1, 7.2 А/см.

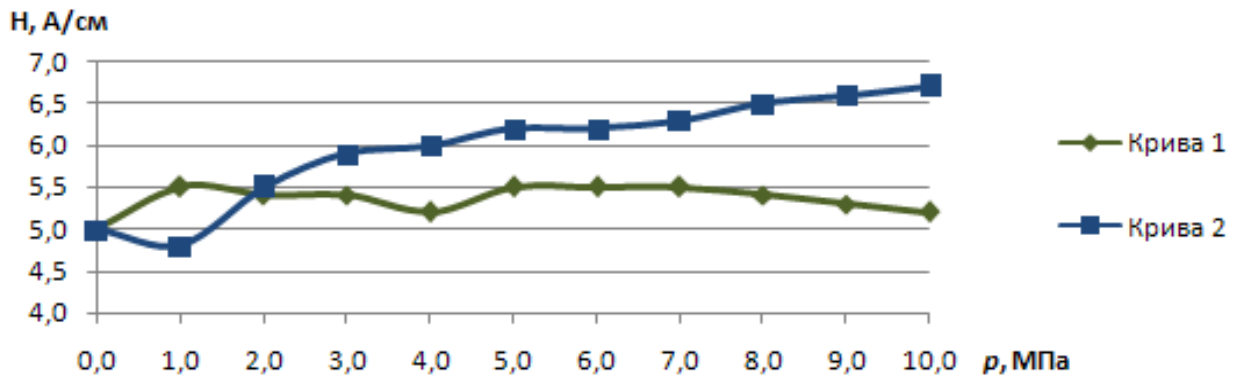


Рис. 5. Залежності зміни коерцитивної сили від внутрішнього тиску в точці 2 дослідного резервуара

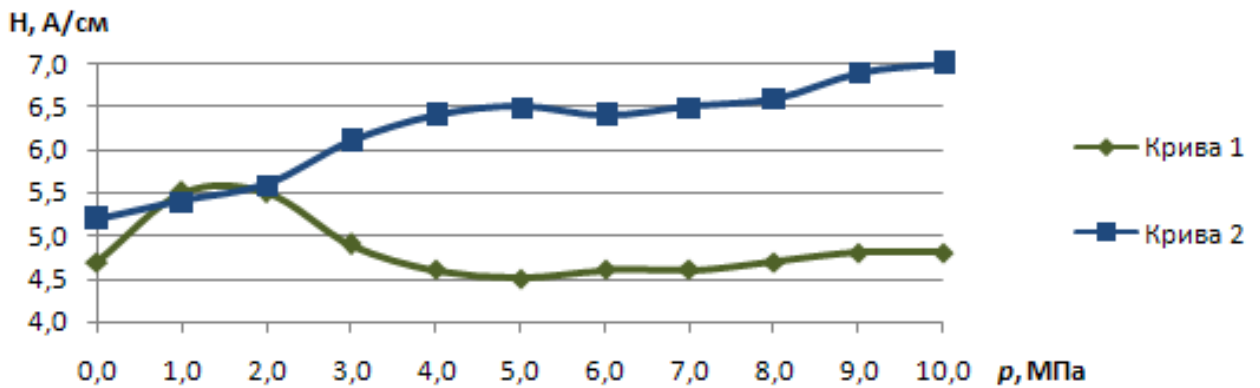


Рис. 6. Залежності зміни коерцитивної сили від внутрішнього тиску в точці 6 випробувального резервуара

Позначивши значення коерцитивної сили $Z_i = H_{ci} [A/cm]$ знаходимо середнє арифметичне значення H_{ci} (математичне очікування \bar{Z} і її довірчий інтервал $\Delta\bar{Z}$) згідно виразів

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}, \quad (3) \quad \Delta\bar{Z} = \pm t_{Di} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

де Z_i – упорядковані значення коерцитивної сили H_{ci} ; t_{Di} – параметр величина якого для двостороннього довірчого інтервалу чисельно рівна значенням коефіцієнта Стюдента; n – кількість вимірювань; S – вибіркова дисперсія.

Перевірка припущення прийнятої моделі нормальності розподілу за W – критерієм, проводилась згідно виразу

$$W = b^2 / S_0^2. \quad (5)$$

Тут характерне число b і величина S_0^2 рівні

$$b = \sum_{i=1}^K a_{ni} (Z_{n-i+1} - Z_i), \quad (6)$$

$$S_0^2 = \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2. \quad (7)$$

Значення a_{ni} для $i = 1, 2, \dots, k$ вибирали за таблицею згідно $n = 4$ [5].

Підставляючи числові дані отримали значення $W = 0,938$, яке більше від 0,935, що забезпечує імовірність не нижчу 50%. Відповідно це дає можливість використання моделі нормального розподілу для описування похибок вимірювання коерцитивної сили H_{ci} за допомогою приладу КРМ-Ц-К2М. Вибіркову дисперсію і довірчий інтервал визначали за формулою

$$S = \sqrt{\frac{S_0^2}{n-1}}. \quad (8)$$

Після підстановки числових значень отримали параметри, які наведені в табл. 4. З табл. 4 видно, що точність визначення коерцитивної сили не перевищує 3,7 %. Така точність визначення коерцитивної сили, задовольняє вимогам, що ставляться до інженерних розрахунків напружено-деформованого стану трубопроводів.

Таблиця 4. Визначення похибки при вимірюванні коерцитивної сили металу котушки 5 випробувального резервуара приладом КРМ-Ц-К2М

Напрямок вимірювань	Упорядковані величини вимірних значень коерцитивної сили H_{ci} , А/см				\bar{Z} , А/см	S^2	t_{Di}	Похибка методу δ_m , %
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4				
перпендикулярно до осі котушки 5	7,0	7,1	7,1	7,2	7,1	0,82	0,13	3,7

Висновки. Аналізуючи вище викладене, можна зробити такі висновки:

1. На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що існує певна закономірність зміни коерцитивної сили в залежності від значень напружень у тілі труби за умов їх пружного і пластичного деформування. Під час експериментальних робіт досліджено вплив величини сумарних напружень на зміну коерцитивної сили металу котушки випробувального резервуара на ділянках: пружних деформацій, максимальних стискаючих пластичних деформацій і в зоні переходу від розтягуючих до стискаючих пластичних деформацій, за умов двовісного статичного навантаження. Отримані результати логічно узгоджуються з номограмами зміни коерцитивної сили, отриманими за умов лінійного напруженого стану, які наведені в нормативному документі [12].

2. Для розглянутої ділянки МГ, виготовленої із сталі 17Г1С, в процесі пружного і пластичного двовісного напруженого стану, експлуатацію розглянутого типу трубопроводу необхідно проводити за умов, при яких значення коерцитивної сили не перевищує $H_c^\perp = 6,5 \text{ А/см}$ в напрямку перпендикулярному до осі труби і $H_c^\parallel = 6,0 \text{ А/см}$ - вздовж осі труби.

1. Білобран Б.С. Диагностика напруженого стану надземного переходу нафтопроводу в зоні зсуву / Б.С. Білобран, В.М. Василюк, О.Б. Кінаш // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. – Львів: Каменяр, 1998. – Вип. 3. – С. 580-584.
2. Бурак Я.Й. Аналітична механіка локально навантажених оболонок / Я.Й. Бурак, Ю.К. Рудавський, М.А. Сухорольський. – Львів: «Інтелект-Захід», 2007. – 240 с.
3. Кантор Б.Я. Вмятина на цилиндрической оболочке, образованная ударом / Б.Я. Кантор, А.Н. Шупиков, Р.Л. Онацкий // Вісник НТУ «ХП», 2012. – № 67. – С. 44-49.
4. Лобанов Л.М. Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коерцитивную силу металла кислородных баллонов / Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.А. Костин [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 4. – 2011. – С. 14-23.
5. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А.Я. Недосека. – К.: Индпром, 1998. – 640 с.

6. Опацкій Р.Л. Образование круглой вмятины на цилиндрической оболочке вдавливанием штампа // Весник НТУ "ХПИ". – 2011. - № 63. – С. 106-113.
7. Ориняк І.В. Залишкова міцність трубопроводів з вм'ятинами / І.В. Ориняк, В.В. Розгонюк, Л.С. Шлапак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – № 5. – С. 79-82.
8. Ориняк І.В. Оценка предельного давления трубы с вмятиной / І.В. Ориняк, Л.С. Шлапак // Проблемы прочности. – 2001. – № 5. – С. 101-110.
9. Оценка текущего состояния остаточного ресурса с выбором оптимальной технологии ремонта оборудования нефтехимических предприятий неразрушающим методом по измерениям коэрцитивной силы металла / Г.Я. Безлюдько, А.Ю. Марченко, Р.Н. Соломаха, В.В. Карабин // матеріали 6-ої міжнародної науково-технічна конференції і виставки [«Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання»], (м. Івано-Франківськ), – 2011. – С. 14-16.
10. Галузева система діагностичного обслуговування обладнання магістральних газопроводів та АГНКС: СОУ 60.3-30019801-006.2004. – [Чинний від 2004-06-29]. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2004. – 178 с. – (Національний стандарт України).
11. Магістральні газопроводи. Оцінка фактичного технічного стану потенційно небезпечних діляниць. Методи і методики: СОУ 60.3-30019801-067:2009. – [Чинний від 2009-04-27]. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2009. – 188 с. – (Національний стандарт України).
12. Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу: МВ 0.00-7.01-05. – Підйомно-транспортна академія України. – Харків, 2005. – 58 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.