УДК 621.791.16 DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.09.04

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙ ВІД СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ І В'ЯЗКІСТЬ РУЙНУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК

В.П. Дядін, Є.О. Давидов, Р.І. Дмитрієнко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі вивчається вплив накопичення пластичної деформації в основному металі трубопроводу від дії внутрішнього тиску на зміну ударної в'язкості зразків Шарпі, виготовлених у поздовжньому та кільцевому напрямках. Дослідження в цьому напрямку проведені на зразку, виготовленому з електрозварної прямошовної труби 630×8 зі сталі 17Г1С. Одержані результати випробування дозволяють скорегувати вимоги до питомої роботи ударних зразків з урахуванням її можливого зниження в залежності від прогнозованого пластичного деформування елемента конструкції та анізотропних властивостей матеріалу. Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 10.

Ключові слова: пластична деформація, старіння, ударна в'язкість, зона термічного впливу, температура крихко-в'язкого переходу, характеристики в'язкості руйнування

В процесі експлуатації в трубопроводах можуть розвиватися різні процеси, в тому числі деформаційне старіння. Його розвиток, з одного боку, призводить до негативних наслідків, які знижують пластичність та показники в'язкості металу трубопроводів та посудин тиску, з іншого – старіння використовується як різновид обробки, що дозволяє підвищити конструкційну міцність сталевих виробів [1].

Безпосередня оцінка впливу деформаційного старіння на зміни властивостей конструкційних матеріалів стикається з рядом труднощів, пов'язаних з відсутністю достовірних зразків-свідків. Використання результатів побічних випробувань, виконаних раніше, не дозволяють гарантувати коректність висновків внаслідок значного розкиду властивостей металопрокату, характерних для конструкційних сталей масового виробництва. Так, в роботах [2–4] відзначається відсутність достовірних даних, що є однією з основних причин протиріч між результатами різних досліджень. Додаткові ускладнення при таких оцінках пов'язані також з тим, що максимально можливі зміни властивостей металу в процесі природного деформаційного старіння після експлуатації повинні визначатися не стільки часом, скільки величиною накопиченої пластичної деформації.

Особливістю пластичних деформацій трубопроводів є їх локальний характер, що ускладнює їх безпосереднє визначення, і можуть досягати 7 і більше відсотків [5]. Крім того, пластичні деформації можуть накопичуватися в місцях механічних пошкоджень, корозійних дефектів, гофрів та інших. Пластична деформація підвищує швидкість корозійних процесів в місцях накопичення пластичних пошкоджень металу.

Зміна локальних механічних, пластичних та корозійних властивостей металу трубопроводів різного призначення є головним практичним результатом їх деформаційного старіння.

З усіх механічних характеристик найбільшу небезпеку в результаті деформаційного старіння представляє зміна схильності конструкційних сталей до крихкого та в'язкого руйнування, які оцінюються по показниках ударної в'язкості (*KCV*), критичної температури крихкості ($T_{кр}$) і номінальному руйнівному напруженню.

Врахування негативного впливу накопичення пластичних деформацій на конструктивну міцність досить широко розглянуто в роботах [6–11].

Проведені дослідження в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ показують, що при наявності тріщиноподібних дефектів в трубопроводі в'язкість конструкційних сталей визначається їх опором ініціюванню і росту в'язкої тріщини аж до утворення пластичної зони чи наскрізного дефекту. На початковій стадії здатність матеріалу чинити опір ініціюванню підростання в'язкої тріщини характеризується деформаційним критерієм δ_i (значення критичного розкриття вершини дефекта в момент ініціювання в'язкої тріщини). Друга стадія, пов'язана зі стійким зростанням тріщини, характеризується тангенсом кута розкриття стабільно рухомої тріщини (СОА) [12, 13].

З вітчизняної і зарубіжної практики відомо, що існуючи вимоги до величини ударної в'язкості зразка Шарпі досить добре корелюють з опором конструкційних сталей та їх з'єднань можливому руйнуванню, які, в свою чергу, характеризу-

Дядін В.П. – https://orcid.org/0000-0002-2061-8436, Давидов Є.О. – https://orcid.org/0000-0003-3470-2329,
Дмитрієнко Р.І. – https://orcid.org/0000-0001-8842-5051
© В.П. Дядін, Є.О. Давидов, Р.І. Дмитрієнко, 2021

ються за допомогою різних критеріїв механіки руйнування. Таким чином, значення ударної в'язкості зразка Шарпі непрямим чином характеризують опір конструкційних матеріалів та їх з'єднань можливому зростанню дефектів.

Розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ підходи щодо визначення характеристик δ_i (мм), $K_{1c}^{(t)}$ (кгс/мм$^{3/2}$) і СОА (tgα) за результатами ударних випробувань стандартних зразків Шарпі товщиною 10 мм (ГОСТ 9454-78) та міцності дозволяють значно спростити таку оцінку [12–17]:

$$\delta_i = 0{,}05\, KCV_{\max}/\sigma_{0,2} \qquad (1)$$

$$K_{1c}^{(t)} = (A \cdot E \cdot KCV^{(t)}/(1-\nu^2))^{0,5} \qquad (2)$$

$$\operatorname{tg}\alpha = 0{,}5\frac{\sigma_в}{\sigma_{0,2}}\varepsilon_в(1+\varepsilon_в)\,, \qquad (3)$$

де $K_{1c}^{(t)}$ – характеристика тріщиностійкості при розвитку наскрізної тріщини в конструктивному елементі товщиною t для температури T; A – коефіцієнт кореляції; $KCV^{(t)}$ – ударна в'язкість зразка Шарпі (Дж/см^2) при скоригованій температурі T^t з урахуванням товщини; $KCV_{\max}$ – питома робота руйнування зразка Шарпі на «верхньому шельфі» (при повністю в'язкому руйнуванні): $T^t = T + \Delta T$, де ΔT – зсув температури при обмеженні товщини конструктивних елементів (5 мм < t < 10 мм); $\varepsilon_в$ – деформація, яка відповідає тимчасовому опору матеріалу $\sigma_в$; $\sigma_{0,2}$ – межа плинності (кгс/мм^2); E – модуль пружності (кгс/мм^2).

Залежність (3) має певний фізичний зміст, суть якого полягає в тому, що кут розкриття зростаючої стабільної тріщини (tg α) буде падати зі зниженням пластичних властивостей матеріалу. Як наслідок, це буде призводити до росту протяжності підростаючої тріщини у випадку зменшення рівномірної складової пластичної деформації металу $\varepsilon_в$.

Вплив пластичного деформування на зміну характеристик $KCV_{\max}$, виготовлених у поперечному напрямі до напрямку деформування, та $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$ було досліджено раніше [6] на прикладі сталі 09Г2С. Як випливає з роботи [6], попереднє деформування металу значно знижує значення ударної в'язкості $KCV_{\max}$ на верхньому шельфі і збільшує температуру крихко-в'язкого переходу ($T_{квп}$) та межу плинності $\sigma_{0,2}$ при незначній зміні тимчасового опору $\sigma_в$ досліджених сталей.

Для більш ретельного вивчення можливого впливу накопиченої залишкової деформації в трубопроводі на зміну ударної в'язкості зразків Шарпі в поздовжньому та кільцевому напрямках, був виготовлений натурний зразок з труби 630×8 мм в лабораторних умовах Інституту. За конструкцією зразок складався з відрізка труби та двох плоских днищ (власного виготовлення) з розмірами, які дозволяли проведення статичних навантажень гідравлічним тиском до руйнування. З метою забезпечення задовільних умов для зварювання зразка та запобігання руйнування від появи зони незворотних деформацій під час випробувань днище було оснащене приварними котушками того ж діаметру, що і труба. Для цього від обох торців (А і Б) труби відрізалося по одній котушці завширшки 100…120 мм (рис. 1).

Основною метою проведення гідравлічних випробувань було напрацювання в металі натурного зразка деформованих ділянок в трубі для подальшого їх дослідження.

Характеристика складових зразка:

– труба 630×8 електрозварна прямошовна по ГОСТ 10705 та ГОСТ 10701, що була в експлуатації, зовнішня і внутрішня поверхні уражені корозією, товщина стінки за замірами товщиноміром ТУЗ-3 – 6,9…7,6 мм, довжина – 2970 мм, матеріал – сталь 17Г1С;

– днище зварне плоске (2 од.) власного виготовлення з листової сталі Ст20 товщиною 50 мм з ре-

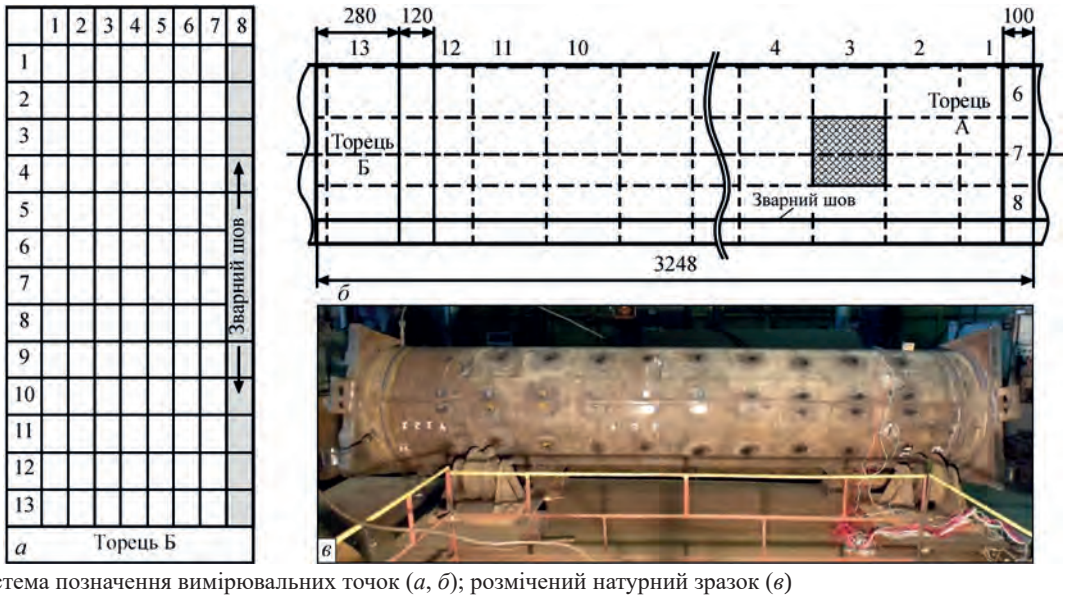

Рис. 1. Система позначення вимірювальних точок (*а*, *б*); розмічений натурний зразок (*в*)

Рис. 2. Загальний вигляд днища

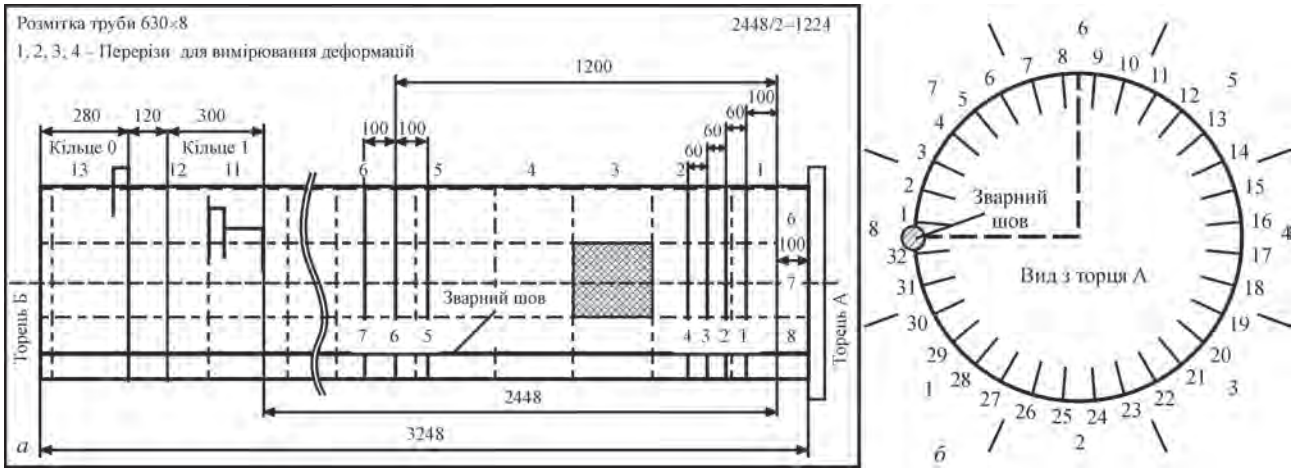

Рис. 3. Позначення для виміру залишкових деформацій: *а* – перерізи 1…7; *б* – точки 1…32 для позначення вимірювальних баз

брами жорсткості товщиною 30 мм в кількості 6 од. (рис. 2).

Для відстеження зміни геометричних параметрів (залишкової деформації) на поверхні труби в вихідному стані була нанесена система позначення точок та перерізів, в яких здійснювалися виміри. Торці натурного зразка були позначені як А і Б. Поверхня труби була поділена на 8 поздовжніх смуг та 13 кілець, на перетині яких утворювалися циліндричні сектори розміром 247,78×247,78 мм (рис. 3). До зварювання зразка з труби вирізалось кільце («кільце 0») для дослідження металу труби у недеформованому стані.

Рис. 4. Загальний вигляд місця руйнування контрольного зразка труби після гідравлічного навантаження тиском 13,25 МПа

Для досягнення максимальних деформацій зразок труби доводився гідравлічним випробуванням до руйнування (рис. 4).

Після закінчення випробування на пластичне деформування натурний зразок був підданий вимірюванням неруйнівними методами контролю (табл. 1).

Метал з середньої частини зразка, де спостерігалась максимальна пластична деформація, було використано для виготовлення зразків руйнівних видів випробувань (див. табл. 1, фрагмент зразка вказано чорним кресленням).

Дослідження проводились на зразках, які були виготовлені в осьовому та кільцевому напрямках. Розташування зразків та положення надрізу вказано на рис. 5.

Зразки виготовлялись з недеформованого фрагменту труби («кільце 0») та деформованого фрагменту труби, вказаного в табл. 1.

Для кожного напрямку вказаних фрагментів було виготовлено по 24 зразка Шарпі. Зразки для деформованого випадку підлягали природньому старінню протягом 40 діб.

Загальний вигляд зразків, виготовлених в осьовому та кільцевому напрямках, показано на рис. 6.

Випробування на ударний вигин виконувалося в діапазоні температур від –60 до 40 °С.

Результати випробувань зразків, виготовлених з недеформованого фрагменту труби («кольцо 0»), показані у табл. 2. та на рис. 7.

Таблиця 1. Розподіл залишкової деформації (%) в кільцевому напряму після гідравлічних навантажень труби в зоні перерізів 1-4 та 5-7 (l_o = 61,00 мм)

Сектор	Ділянка	Точки	(←Торець А) Перерізи (Торець Б →)						
			1	2	3	4	5	6	7
8	1	1-2	2,85	3,03	3,74	3,69	3,36	4,39	4,51
	2	2-3	3,13	3,39	3,70	3,62	3,61	4,23	4,02
7	3	3-4	3,13	3,75	3,23	3,85	Т 3,56	Р 3,51	4,13
	4	4-5	2,85	3,03	3,64	3,84	3,43	3,67	4,11
	5	5-6	2,90	2,77	2,69	3,07	3,03	3,36	3,30
	6	6-7	3,03	3,02	3,39	2,84	3,23	3,82	Р 3,64
6	7	7-8	3,33	3,15	3,84	4,31	3,92	3,80	3,75
	8	8-9	3,13	3,15	3,16	3,13	2,87	3,92	3,41
	9	9-10	2,56	2,49	2,44	2,33	3,20	3,20	2,97
	10	10-11	2,49	2,41	2,36	2,31	3,07	3,00	2,84
5	11	11-12	1,93	2,84	2,80	3,03	2,54	2,49	2,90
	12	12-13	1,90	2,08	2,05	2,28	2,03	2,59	2,25
	13	13-14	1,49	1,77	1,61	1,75	1,54	2,16	2,28
	14	14-15	1,92	1,26	1,72	1,66	1,64	2,59	2,77
4	15	15-16	2,00	1,89	2,56	2,49	2,66	2,80	2,80
	16	16-17	2,33	2,28	2,69	2,69	2,67	2,67	3,18
	17	17-18	0,97	1,16	1,77	1,70	1,57	2,33	1,46
	18	18-19	0,77	0,67	0,69	0,72	0,67	1,41	0,80
3	19	19-20	1,69	1,90	2,10	2,26	1,92	2,67	2,56
	20	20-21	2,11	2,87	3,36	3,26	2,49	2,41	2,72
	21	21-22	2,44	2,31	2,66	2,34	2,90	Р 3,05	Р 3,03
	22	22-23	1,92	2,28	1,87	1,59	К 2,66	К 2,87	2,80
2	23	23-24	1,92	2,07	2,48	2,70	2,33	Н 2,05	2,02
	24	24-25	2,44	3,05	3,46	4,39	2,54	Н 3,18	2,97
	25	25-26	2,74	3,34	3,69	3,57	3,79	3,74	3,64
	26	26-27	2,98	3,15	2,82	3,13	Н 3,43	Н 4,30	3,38
1	27	27-28	2,54	2,26	2,89	3,52	Н 2,28	Н 3,43	3,05
	28	28-29	2,92	3,64	3,21	3,59	3,33	4,21	3,90
	29	29-30	3,36	3,13	3,03	3,43	3,38	3,79	3,64
	30	30-31	2,82	2,74	2,77	2,80	2,52	2,70	2,69
8	31	31-32	2,80	3,07	3,69	3,62	3,46	3,95	3,67
	32	32-1	1,57	2,31	2,31	2,61	2,67	2,90	2,64
Середнє	%		2,41	2,57	2,76	2,88	2,76	3,16	3,06

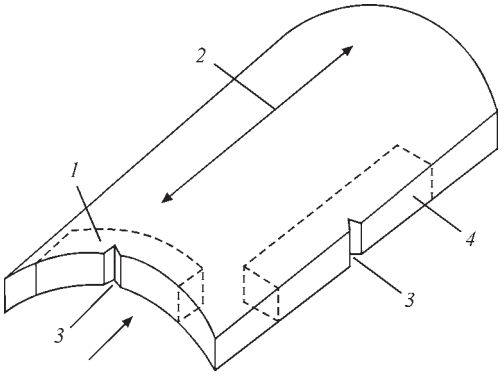

Рис. 5. Розташування зразків та положення надрізу ударних зразків Шарпі (*KCV*) в трубі: *1* – загальний вигляд ударних зразків, вирізаних в кільцевому напрямку; *2* – напрямок поздовжньої осі труби; *3* – орієнтація V-подібного надрізу; *4* – загальний вигляд ударних зразків, вирізаних в осьовому напрямку. Розмір осьових зразків 10,0 × 6,9 ± 0,1 мм – обробка, для поперечних ~ 10,0×7,1 мм – без обробки

Результати механічних випробувань зразків на розтягнення, виготовлених з недеформованого фрагменту труби, показані у табл. 3.

Як легко бачити з рис. 7, метал стінки труби має значну анізотропію властивостей ударної в'язкості в кільцевому та осьовому напрямках, що свідчить про низькій супротив даного матеріалу до росту тріщини в осьовому напрямку.

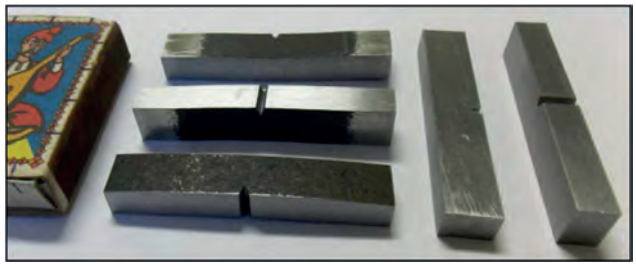

Рис. 6. Загальний вигляд ударних зразків для кільцевого та осьового напрямків

Крім того, спостерігається значна різниця в температурах крихко-в'язкого переходу для осьових та кільцевих напрямків, визначених за критерієм 30 Дж/см^2.

Так, для осьового напрямку ця температура складає близько –48 °С, в той час як для кільцевого напрямку – –15 °С.

Враховуючі, що температура крихко-в'язкого переходу ($T_{квп}$) при пластичному деформуванні металу має схильність до зростання, то за умов накопичення пластичного деформування метала на окремих ділянках труби це може призвести до зсуву $T_{квп}$ в плюсову область температур. Як наслідок, це може призвести до значного падіння службових властивостей металу труби.

Таблиця 2. Результати випробувань ударних зразків Шарпі, виготовлених з недеформованого фрагменту труби

Номер п/п	Кільцевий напрямок					Осьовий напрямок				
	B, мм	H_1, мм	*F*, мм^2	*t*, °С	*KCV*, Дж/см^2	В, мм	H_1, мм	*F*, мм^2	*t*, °С	*KCV*, Дж/см^2
1	7,46	8,25	61,55	–40	38,18	6,94	8,12	56,35	–40	47,03
2	7,46	8,25	61,55	–40	28,76	6,94	8,23	57,12	–40	66,88
3	7,38	8,28	61,11	–40	24,87	6,94	8,20	56,91	–40	41,29
4	7,44	8,14	60,56	–20	28,90	6,94	8,22	57,05	–20	72,22
5	7,42	8,35	61,96	–20	27,76	6,94	8,22	57,05	–20	67,84
6	7,43	8,30	61,67	–20	30,16	6,94	8,20	56,91	–20	70,64
7	7,38	8,35	61,62	0	55,66	6,94	8,24	57,19	0	111,38
8	7,40	8,35	61,79	0	44,51	6,94	8,20	56,91	0	119,84
9	7,42	8,32	61,73	0	40,01	6,94	8,28	57,46	0	126,35
10	7,45	8,16	60,79	+20	66,13	6,94	8,18	56,77	+20	150,26
11	7,44	8,29	61,68	+20	67,93	6,94	8,16	56,63	+20	138,27
12	7,45	8,27	61,61	+20	65,25	6,94	8,24	57,19	+20	130,09
13	7,49	8,23	61,64	+40	66,52	6,94	8,20	56,91	+40	140,92
14	7,42	8,15	60,47	+40	66,81	6,94	8,28	57,46	+40	129,66
15	7,47	8,36	62,45	+40	67,09	6,94	8,30	57,60	+40	126,91
16	7,40	8,32	61,57	–60	14,34	6,94	8,18	56,77	–60	45,80
17	7,48	8,24	61,64	–60	18,30	6,94	8,18	56,77	–60	13,48
18	7,46	8,30	61,92	–60	9,50	6,94	8,12	56,35	–60	29,94

Для вирішення цього питання у таблиці № 4 та рис. 8 приведені результати іспитів ударних зразків Шарпі, виготовлених з фрагменту кільця труби, який зазнав пластичне деформування близько 3,5 % (див. табл. 1).

На рис. 9, 10 приведені порівняльні графіки результатів іспитів ударних зразків Шарпі, виготовлених з недеформованого та деформованого (3,5 %) фрагментів труби.

Як можна бачити з рис. 9 та 10, після деформування металу труби в кільцевому напрямку на 3,5 % спостерігається значний зсув температур крихко-в'язкого переходу для осьового та кільцевого напрямків, визначених по критерію 30 Дж/см^2. В даному випадку зсув температур крихко-в'язкого переходу для осьового та кільцевого напрямків оцінювався за мінімальними значеннями ударної в'язкості зразків Шарпі. Слід також зазначити, що на вплив пластичного деформування металу труби в кільцевому напрямку (3,5% пластичної деформації) на загальну зміну температури крихко-в'язкого переходу більш чутливо реагують зразки, виготовлені в осьовому напрямку ніж в кільцевому. Так, з приведених графіків залежності ударної в'язкості зразків Шарпі від температури випробувань випливає, що загальний зсув температур крихко-в'язкого переходу складає 40 °С для осьового напрямку та близько 20 °С – для кільцевого напрямку. Разом с цим температура крихко-в'язкого переходу, яка визначена на зразках в кільцевому напрямку є значно вищою, ніж для зразків в осьовому напрямку. Крім того, у в'язкому стані спостерігається падіння ударної в'язкості зразків Шарпі для кільцевого напрямку при деформуванні труби на 3,5 % в процесі гідравлічного навантаження, що відсутнє для зразків в осьовому напрямку (див. рис. 9, 10).

Останній випадок повністю підтверджує справедливість запропонованого підходу до зниження характеристик опору крихкому та в'язкому руйнуванню металу трубопроводів під впливом деформаційного старіння.

З приведених вище результатів слід зазначити, що проведення випробувань зразків Шарпі, виготовлених в напрямку осі трубопроводу, призводить до значної помилки оцінки супротиву матеріалу трубопроводу крихкому та квазікрихкому руйнуванню. Так, при оцінці перехідної температури по зразкам ударної в'язкості при 30 Дж/см^2

Таблиця 3. Результати механічних властивостей недеформованого фрагменту труби

Показники	Недеформований фрагмент («кільце 0»)	
	В осьовому напрямку	В кільцевому напрямку
Межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	410...410	490...494
Тимчасовий опір розриву $\sigma_в$, МПа	568...581	591...593
Відносне подовження δ_5, %	24,9...26,9	21,3...22,3

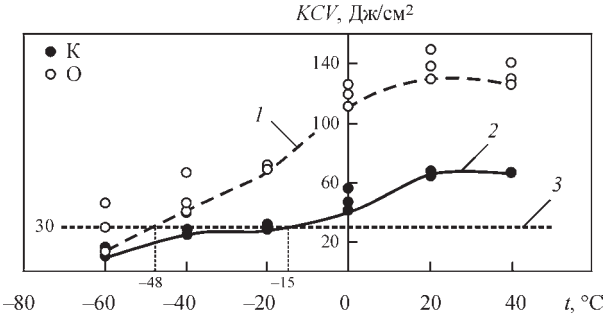

Рис. 7. Температурна залежність ударної в'язкості зразків Шарпі, орієнтованих в кільцевому (К) та осьовому (О) напрямках для недеформованого металу труби: *1* – крива по мінімальних значеннях для кільцевих зразків; *2* – крива по мінімальних значеннях для осьових зразків; *3* – рівень 30 Дж/см^2

Таблиця 4. Результати випробувань ударних зразків, виготовлених з деформованого на 3,5 % фрагменту зразка труби

Номер п/п	Кільцевий напрямок					Осьовий напрямок				
	B, мм	H_1, мм	*F*, мм²	*t*, °С	*KCV*, Дж/см²	*B*, мм	H_1, мм	*F*, мм²	*t*, °С	*KCV*, Дж/см²
1	7,1	8,0	56,80	–60	7,75	6,88	8,06	55,45	–60	24,71
2	7,1	8,06	57,23	–60	7,71	6,86	8,0	54,88	–60	10,71
3	7,1	8,0	56,80	–60	5,35	6,87	8,03	55,17	–60	6,58
4	7,0	7,92	55,44	–40	12,03	6,85	7,95	54,46	–40	11,70
5	7,15	8,03	57,41	–40	13,83	6,86	8,07	55,36	–40	10,46
6	7,1	8,15	57,87	–40	12,37	6,86	8,07	55,36	–40	11,51
7	7,0	7,9	55,30	–20	13,29	6,86	8,05	55,22	–20	40,02
8	7,1	7,9	56,09	–20	24,43	6,86	8,12	55,70	–20	13,20
9	7,0	8,06	56,42	–20	19,14	6,86	8,06	55,29	–20	25,14
10	7,05	7,93	55,91	0	25,04	6,86	8,13	55,77	0	54,15
11	7,1	7,95	56,45	0	26,40	6,86	8,08	55,43	0	46,91
12	7,0	8,02	56,14	0	26,18	6,87	8,0	54,96	0	47,31
13	7,1	8,2	58,22	+20	48,78	6,88	8,1	55,73	+20	117,89
14	7,1	8,06	57,23	+20	54,69	6,88	7,91	54,42	+20	119,44
15	7,1	8,1	57,51	+20	49,21	6,85	8,05	55,14	+20	127,49
16	7,1	8,06	57,23	+40	52,25	6,86	8,03	55,09	+40	127,25
17	7,1	8,0	56,80	+40	52,64	6,86	8,07	55,36	+40	125,72
18	7,0	8,04	56,28	+40	53,13	6,88	8,16	56,14	+40	127,18

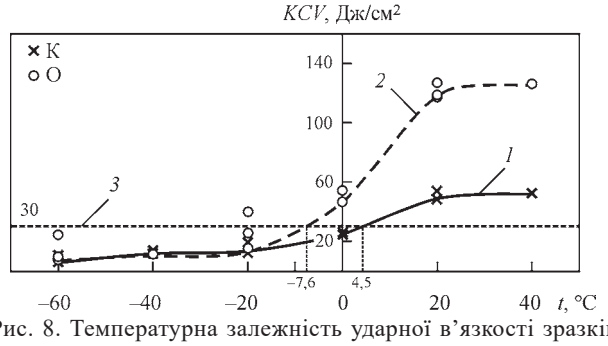

Рис. 8. Температурна залежність ударної в'язкості зразків Шарпі, орієнтованих в кільцевому (К) та осьовому (О) напрямках для деформованого металу труби: *1* – крива по мінімальних значеннях для кільцевих зразків; *2* – крива по мінімальних значеннях для осьових зразків; *3* – рівень 30 Дж/см²

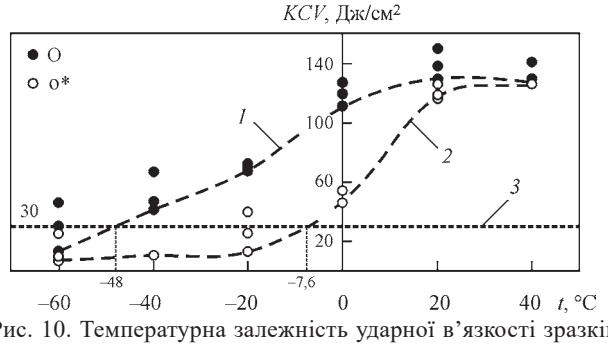

Рис. 10. Температурна залежність ударної в'язкості зразків Шарпі, орієнтованих в осьовому напрямку для недеформованого (О) та деформованого (о*) металу труби: *1* – крива по мінімальних значеннях для зразків для недеформованого металу; *2* – для деформованого; *3* – рівень 30 Дж/см²

для недеформованої труби, помилка сягає більше 40 °С. Крім того, супротив в'язкого руйнування (KCV_{max}) матеріалу в осьовому та кільцевому напрямках відрізняється майже у два рази, що тільки погіршує таку оцінку (див. рис. 7, 8).

Така ж тенденція має місце і для деформації труби в кільцевому напрямку на 3,5 %, де при оцінці перехідної температури по зразкам ударної в'язкості

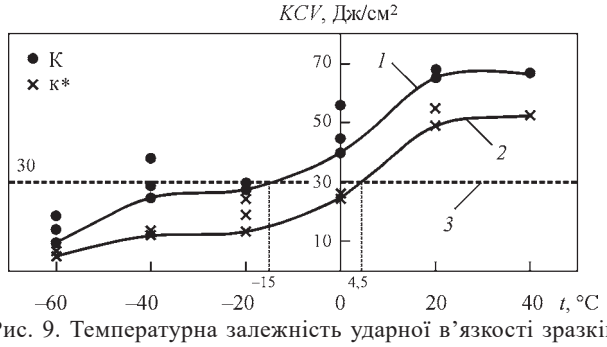

Рис. 9. Температурна залежність ударної в'язкості зразків Шарпі, орієнтованих в кільцевому напрямку для недеформованого (К) та деформованого (к*) металу труби: *1* – крива по мінімальних значеннях для зразків для недеформованого металу; *2* – для деформованого; *3* – рівень 30 Дж/см²

при 30 Дж/см², помилка сягає більше 12 °С при падінні супротиву в'язкому руйнуванню (KCV_{max}) матеріалу більш ніж у два рази. У даному випадку навіть не враховується підвищення межі плинності $\sigma_{0,2}$.

Отримані висновки можуть бути корисними для оцінки супротиву зони термічного впливу зварних з'єднань крихкому та квазікрихкому руйнуванню трубопроводів.

Висновки

1. Пластичне деформування стінки трубопроводу може істотно знижувати характеристики опору в'язкого руйнування (δ_i, tgα, *KCV*, $\varepsilon_в$, $T_{квп}$) навіть відносно невеликих значеннях пластичного деформування на його локальних ділянках. Так, наприклад, для сталі 17Г1С товщиною 7,0 мм, при оцінці перехідної температури по зразкам ударної в'язкості при 30 Дж/см² для деформованої труби на 3,5 % , помилка сягає більше 12 °С.

2. Визначення температури крихко-в'язкого переходу по мінімальним значенням ударної в'язкості зразків Шарпі для осьового напрямку не від-

повідає дійсному стану та є значно заниженою порівняно до зразків, виготовлених у кільцевому напрямку. Так, наприклад, для сталі 17Г1С товщиною 7,0 мм, при оцінці перехідної температури по зразках ударної в'язкості при 30 Дж/см^2 для недеформованої труби, помилка сягає більше 30 °С.

3. Отримані висновки можуть бути корисними для оцінки супротиву зварних з'єднань крихкому та квазікрихкому руйнуванню трубопроводів.

Список літератури

1. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. (1972) *Деформационное старение стали*. Москва, Металлургия.
2. Патон Б.Е., Семенов С.Е., Рыбаков А.А. др. (2000) О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов. *Автоматическая сварка*, **7**, 3–12.
3. Гиренко В.С., Семенов С.Е., Гончаренко Л.В. (2001) Деформационное старение трубных сталей. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 32–35.
4. Пашков Ю.И., Анисимов Ю.И., Ланчаков Г.А. др. (1996) Прогнозирование остаточного ресурса прочности магистральных газо-нефтепроводов с учетом продолжительности эксплуатации. *Строительство трубопроводов*, **2**, 2–5.
5. Пашков Ю.Н. (1996) *Трещиностойкость сварных труб для газопроводов*. Автореф. дис. … д-ра тех. наук. Москва.
6. Дядин В.П. (2007) Влияние предварительного деформирования на ударную вязкость образца Шарпи. *Автоматическая сварка*, **1**, 28–33
7. Золотаревский В.С. (1998) *Механические свойства металлов*. Москва, МИСИС.
8. Мочернюк Н.П., Красневский С.М., Лазаревич Г.И. и др. (1991) Влияние времени эксплуатации магистрального газопровода и рабочего давления газа на физико-механические характеристики трубной стали 19Г. *Газовая промышленность*, **3**, 34–36.
9. Гумеров А.Г. (1998) *Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта*. Москва, Недра.
10. (1967) *Структура и механические свойства металлов*. Москва, Металлургия.
11. Гафаров Н.А. Гончаров А.А., Кушнаренко В.М. (1998) *Коррозия и защита оборудования сероводородосодержащих нефтегазовых месторождений*. Москва, Недра.
12. Гиренко В.С., Дядин В.П. (1990) Корреляция характеристик трещиностойкости материалов и сварных соединений с результатами стандартных механических испытаний. *Автоматическая сварка*, **6**, С.1–4.
13. Сиратори М., Миеси Т., Мицусима Х. (1986) *Вычислительная механика разрушения*. Москва, Мир.
14. Phaal, R., Madnald, K.A., Brown, P.A. (1993) *Correlations between fracture toughness and charpu impact energe.* Doc. 5605/7/93.
15. Гиренко В.С., Дядин В.П. (1985) Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения δ_{ic}, K_{1c} конструкционных сталей и их сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **9**, 14–22.
16. Дядин В.П. (2010) Оценка величины температурного сдвига в зависимости от толщины образца по силовому и деформационному критериям механики разрушения. *Там же*, **4**, 19–27.
17. Троицкий В.И., Дядин В.П. (2011) Выбор контрольных участков магистральных газопроводов при диагностическом обследовании. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 44–47.

References

1. Babich, V.K., Gul, Yu.P., Dolzhenkov, I.E. (1972) *Strain ageing of steel.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Paton, B.E., Semenov, S.E., Rybakov, A.A. et al. (2000) Ageing and procedure of evaluation of the state of metal of the main pipelines in service. *The Paton Welding J.*, **7**, 2-10.
3. Girenko, V.S., Semenov, S.E., Goncharenko, L.V. (2001) Strain ageing of pipe steels. *Tekh. Diagrost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 32-35.
4. Pashkov, Yu.I., Anisimov, Yu.I., Lanchakov, G.A. et al. (1996) Prediction of residual strength limit of main gas and oil pipelines taking into account the operating time. *Stroitelstvo Truboprovodov*, **2**, 2–5 [in Russian].
5. Pashkov, Yu.N. (1996) *Crack resistance of welded pipes for gas pipelines*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Moscow [in Russian].
6. Dyadin, V.P. (2007) Influence of pre-deformation on impact toughness of Charpy sample in fracture. *The Paton Welding J.*, **1**, 22-26.
7. Zolotarevsky, V.S. (1998) *Mechanical properties of metals*. Moscow, MISIS [in Russian].
8. Mochernyuk, N.P., Krasnevsky, S.M., Lazarevich, G.I. et al. (1991) Influence of operating time of main gas pipeline and working gas pressure on physical-mechanical characteristics of pipe steel 19G. *Gazovaya Promyshlennost*, **3**, 34–36 [in Russian].
9. Gumerov, A.G. (1998) *Defectiveness of oil pipelines and methods of their repair*. Moscow, Nedra [in Russian].
10. (1967) *Structure and mechanical properties of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Gafarov, N.A., Goncharov, A.A., Kushnarenko, V.M. (1998) *Corrosion and protection of hydrogen sulfide-containing oil and gas fields*. Moscow, Nedra [in Russian].
12. Girenko, V.S., Dyadin, V.P. (1990) Correlation of crack resistance characteristics of materials and welded joints with results of standard mechanical tests. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 1–4 [in Russian].
13. Siratori, M., Miesi, T., Mitsushima, H. (1986) Computational fracture mechanics. Moscow, Mir [in Russian].
14. Phaal, R., Madnald, K.A., Brown, P.A. (1993) *Correlations between fracture toughness and Charpy impact energy.* Doc. 5605/7/93.
15. Girenko, V.S., Dyadin, V.P. (1985) Dependencies between impact toughness and fracture mechanics criteria δic, K1c of structural steels and their welded joints. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 14–22 [in Russian].
16. Dyadin, V.P. (2010) Evaluation of temperature shift depending upon the specimen thickness by the force and deformation criteria of fracture mechanics. *The Paton Welding J.*, **4**, 14-21.
17. Troitskii, V.A., Dyadin, V.P. (2011) Selection of control sections of the main pipelines for diagnostic examination. *Tekh. Diagrost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 5-11 [in Russian].

INFLUENCE OF DEFORMATIONS FROM STATIC LOADS ON IMPACT AND FRACTURE TOUGHNESS OF CYLINDRICAL SHELLS

V.P. Dyadin, Ye.O. Davydov, R.I. Dmytrienko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kyiv.ua

The work studies the effect of accumulation of plastic deformation in the base metal of the pipeline from the action of inner pressure on the change of impact toughness of the Charpy specimens made in the longitudinal and circumferential directions. The studies in this direction are carried out on the specimen made from LSAW pipe of 630 × 8 from 17G1S steel. The obtained test results allow correcting the requirements to the specific work of impact specimens taking into account its possible reduction depending on the predicted plastic deformation of the structural element and anisotropic properties of the material. 17 Ref., 4 Tabl., 10 Fig.

Keywords: plastic deformation, aging, impact toughness, heat-affected-zone, brittle-tough transition temperature, fracture toughness characteristics

Надійшла до редакції 25.06.2021