

ВІДНОВЛЕННЯ КЛЕПАНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗВАРЮВАННЯМ

А.Ю. Барвінко, Ю.П. Барвінко, А.М. Яшник, О.С. Костеневич

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: tanksweld@gmail.com

У результаті проведених досліджень було встановлено, що для стінки клепаних резервуарів була застосована вуглецева сталь з низьким вмістом вуглецю: 0,045...0,05 % при наявності мангану 0,4...0,5 %. Враховуючи те, що при цьому вміст азоту складає приблизно 0,0030 %, а кисню – 0,03 %, досліджувану сталь можна розглядати як напівспокійну. Вміст сірки в сталі може досягати 0,1 %. Однак беручи до уваги, що структура основного металу та ЗТВ переважно представлена дрібнозернистим феритом, робота удару для сталі при $T = +15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($60\text{ }^{\circ}\text{F}$) задовольняє умові $KV_{min} = 20$ Дж, окрихчування металу по лінії сплавлення відсутнє. Це свідчить про можливість з достатньою ймовірністю виключити крихке руйнування зварних з'єднань вказаної сталі та відновлювати клепані резервуари за допомогою зварювання. Розроблені на основі результатів проведених досліджень технічні рішення були апробовані під час ремонту резервуарів, які перебували в експлуатації 86 та 114 років. Успішна наступна експлуатація протягом 10 років з максимальним рівнем наливу нафтопродукту відновлених клепаних резервуарів підтвердила правильність прийнятих рішень. Бібліогр. 27, табл. 7, рис. 19.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, зварюваність, крихке руйнування, зварні конструкції, клепані резервуари, ремонт

Вступ. Один із найбільших регіонів за запасами та видобутком нафти є Південно-Каспійський нафтогазоносний басейн, розташований на території Апшеронського півострова (Азербайджан) і прилеглої акваторії Каспійського моря. Промислова розробка нафти там почалася з останньої третини 19 століття, і, починаючи з 1870 р. по сьогоднішній день, було видобуто більше як 2 млрд т нафти [1]. Великий внесок у розвиток нафтової галузі в цьому регіоні було зроблено братами Нобелями. Після відкриття Робертом Нобелем у 1873 р. значних покладів нафти на Апшеронському півострові ним було придбано перший нафтоперегінний завод. У 1879 р. створюється «Товариство нафтового виробництва братів Нобель» (скорочено «БраНобель») – на той час перша в Російській імперії вертикально інтегрована компанія [2], що інтенсивно розвивалася. Так, за період 1879–1904 рр. заводами компанії було перероблено 19,6 млн т нафти і вироблено 6,2 млн т гасу, 39 тис. т бензину, 0,76 млн т солярового мастила, 0,82 млн т мастильної оливи, 11,7 млн т нафтових залишків. У 1889 р. «БраНобель» досягла піка видобутку нафти – 8,6 % світового об'єму [3]. Такий бурхливий розвиток компанії потребував застосування сучасних інженерних ідей і технологій.

У 1877 р. у Баку (Азербайджан) відкрилося відділення «Строительной конторы инженера А.В. Бари» [4]. Головним інженером стає В.Г. Шухов. Разом з А.В. Барі вони знайомлять Людвіга Нобеля зі своїми інженерними розробками, і після цього починається тісне співробітництво ком-

паній. Стрімкий розвиток нафтоперероблення та транспортування нафти потребував створення резервуарних парків великою місткістю. У 1878 р. В.Г. Шухов вперше у світі спроектував та під його керівництвом було побудовано сталевий клепаний вертикальний циліндричний резервуар для зберігання гасу. У 1883 р. він опублікував теоретичне обґрунтування конструкції сталевих циліндричного резервуара [5]. Контора А.В. Барі разом із проектуванням і будівництвом нафтопроводів побудувала до 1881 р. понад 130 сталевих резервуарів за проектами В.Г. Шухова. А в період 1880–1905 рр. під керівництвом В.Г. Шухова було побудовано біля 3000 сталевих клепаних циліндричних резервуарів загальною ємністю 2,6 млн т для зберігання гасу, нафтопродуктів, нафтових залишків, води тощо [5].

Станом на 1990 р. багато сотень клепаних сталевих резервуарів після 70–100 років експлуатації ще знаходилися в робочому стані [2, 5]. На сьогодні, за оцінкою авторів, у розглянутому вище регіоні можна очікувати наявними в експлуатації до 100 клепаних резервуарів об'ємом до 10 тис. м³, тому питання відновлення їхньої працездатності може бути достатньо актуальним.

Визначення марки сталі та можливості її зварювання. Головним фактором, який визначає принципову можливість проведення ремонту клепаних резервуарів, є марка сталі, що була застосована для циліндричної стінки, і можливість проведення її ремонтного зварювання з отриманням достатнього рівня механічних властивостей звар-

Барвінко А.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5719-0576>, Барвінко Ю.П. – <https://orcid.org/0009-0001-8751-1801>,

Яшник А.М. – <https://orcid.org/0009-0003-8365-210X>, Костеневич О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7427-2805>

©А.Ю. Барвінко, Ю.П. Барвінко, А.М. Яшник, О.С. Костеневич, 2025

них з'єднань для виключення крихкого руйнування ємності. Особливо це питання потребує дослідження, беручи до уваги той факт, що клепані резервуари проектувалися в той час, коли ще не існувало ані теорії крихкого руйнування сталевих конструкцій [6], ані визначення зварюваності сталі.

Дослідження проводилися для сталі, що була застосована для клепаного резервуара 1901 р. будівництва (розробник проекту – конструкторське бюро «Строительная контора інженера А.В. Бари») і резервуара 1929 р. будівництва (розробник проекту невідомий), характеристики яких наведено в табл. 1.

Досліджуване зварне з'єднання було зварене з пластин завтовшки 15 мм, що були вирізані із нижнього поясу стінки резервуара 1929 р. будівництва та імітувало зварювання вертикального ремонтного стикового зварного шва. Розробка кромок у зварному з'єднанні була прийнята симетричною – Х-подібна з кутом 50°. Для ремонтного зварювання був обраний процес механізованого зварювання 135 у суміші M21-ArC-18 суцільним дротом G3Si1 діаметром 1,2 мм. Погонна енергія зварювання для кореневого проходу становила $Q \approx 0,9$ кДж/мм, при заповненні розробки $Q = 1,1 \dots 1,2$ кДж/мм.

Дослідження сталі стінки резервуара 1901 р. будівництва. Для досліджень вирізалися ділянки клепаного горизонтального з'єднання між I та II поясами стінки (рис. 1). Номінальна товщина 1. Геометричні характеристики двох сталевих клепанних вертикальних резервуарів циліндричної форми для зберігання нафти

Рік будівництва резервуара	Діаметр, м	Висота стінки, м	Товщина поясів стінки, мм
1901	23,4	9,54	12+11+9+8+7+6+5
1929	30,73	10,25	15+13+11+9+7+5+5

Таблиця 2. Хімічний склад сталі стінки резервуара 1901 р. будівництва

Товщина металу δ , мм	Вміст хімічних елементів, масова частка %						
	C	Si	Mn	S	P	O	N*
10	0,05	0,011	0,52	0,036	0,05	не визнач.	не визнач.
12	0,045	0,01	0,54	0,043	0,038	0,029	0,0030

*Вміст азоту в киплячій сталі становить $N = 0,04 \dots 0,08$ %.

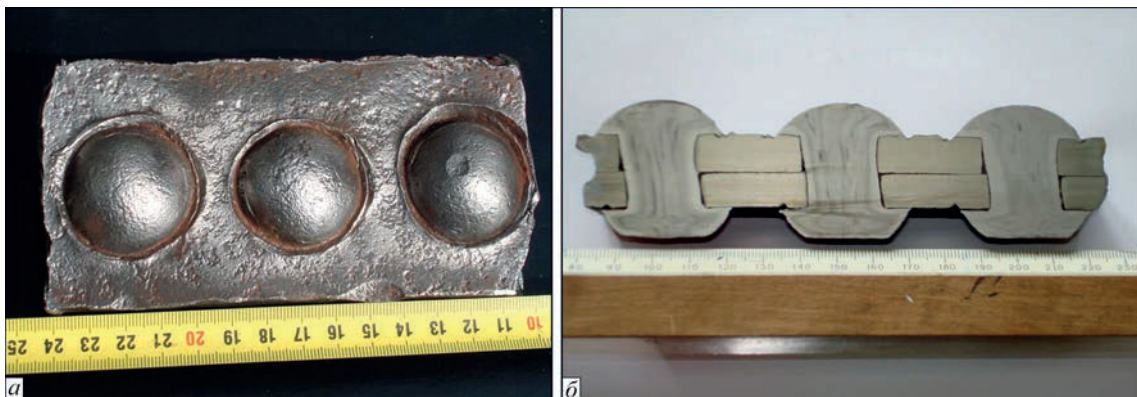


Рис. 1. Горизонтальне клепане з'єднання між I і II поясами стінки резервуара (товщина сталі 12 + 10 мм), 1901 р. будівництва: вигляд ззовні резервуара (а), поперечний макророзріз з'єднання (б)

щина металу δ становила 12 та 10 мм, фактична – 11,6; 11,6 та 10,3; 10,1 мм відповідно. Для дослідження механічних властивостей сталі застосовували поздовжні зразки. Хімічний склад сталі визначали спектральним методом. Властивості міцності визначали за результатами випробувань коротких зразків з діаметром робочої частини 5 мм [7]. Ударну в'язкість визначали на зразках Менаже (U-подібний надріз) [8]. Для товщини сталі $\delta = 12$ мм випробовували зразки 10×10 мм, для $\delta = 10$ мм – 7,5×10 мм. Ударну в'язкість визначали за температури 0 та –20 °С [12].

Неметалеві включення вивчали під час перегляду нетравлених мікрошліфів, мікроструктуру – на мікрошліфах, протравлених у пікраті натрію. Задля можливості порівняння характеристик досліджуваної сталі з близькими марками вуглецевої сталі, що вже застосовувалися для відповідальних зварних конструкцій у найближчому історичному періоді, оцінювання неметалевих включень і характеристик структури сталі виконували згідно з ГОСТ 1778-70 [9] і ГОСТ 5640-68 [10].

Хімічний склад сталі наведено в табл. 2. Аналіз отриманих даних показує, що досліджувану сталь можна класифікувати як конструкційну сталь із невисоким вмістом вуглецю. Враховуючи, що сталь, ймовірно, частково розкислялася вуглецем і манганом, вміст кремнію може не бути визначальним показником ступеня її розкислення. Беручи до уваги низький вміст азоту $N = 0,0030$ %, що менше за допустимий вміст $N < 0,008$ % для напівспокійної (спокійної) сталі [11], а також низький вміст вуглецю $C = 0,05$ % при вмісті кисню $O =$

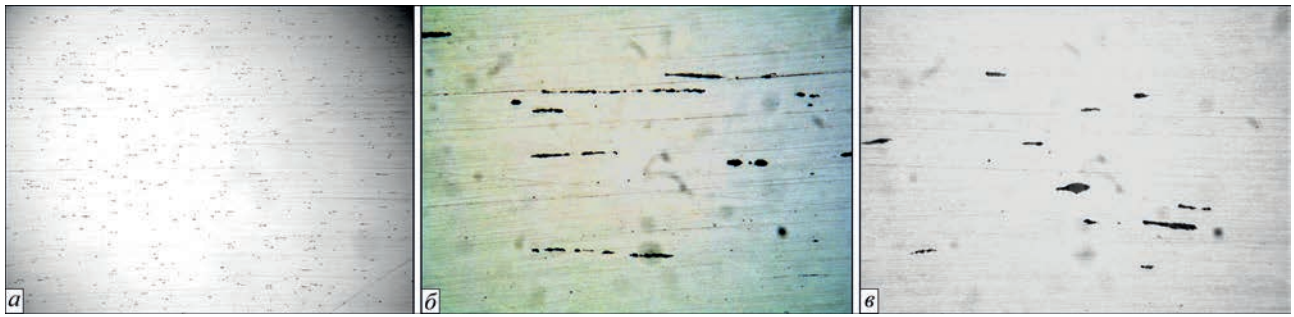


Рис. 2. Сульфіди мангану в сталі, $\delta = 12$ мм: $a - \times 100$, $b - \times 1000$; $v - \delta = 10$ мм, $\times 1000$

$= 0,025 \dots 0,03$ %, досліджену сталь можна розглядати як напівспокійну.

Вміст фосфору $P = 0,05$ % у зразку завтовшки 12 мм не перевищує допустимий для сталі ВСтЗсп [12]. Невисокий вміст вуглецю $C \leq 0,05$ % за відносно помірного вмісту сірки та фосфору має забезпечити задовільну зварюваність напівспокійної низьковуглецевої сталі.

У результаті проведених металографічних досліджень встановлено, що в зразках сталі завтовшки 10 та 12 мм спостерігаються переважно дрібні включення світло-сірого кольору, витягнуті вздовж напрямку прокатування (рис. 2–3). При цьому у зразку 12 мм ці включення більш тонкі та витягнуті (рис. 2 a, b), а у зразку 10 мм – коротші, овальної форми (рис. 2, $v, 3, a, b$).

Мікротвердість цих включень є досить високою: $HV_{0,01} = 5357 \dots 6142$ МПа. Дослідження з використанням сканувального електронного мікроскопа JSM за допомогою енергодисперсійного спектрометра Link 860-500 дозволили встановити, що ці включення можна віднести до сульфідів мангану. Виявлено також поодинокі рядкові включення складного складу, що містять силікат мангану та оксид кальцію (рис. 3).

Забрудненість сульфідами мангану за ГОСТ 1778-70 [9] неможливо оцінити внаслідок невеликого розміру включень. Витягнуті рядки складних включень відповідають балу № 2 (рядкові оксиди та силікати) [9].

Для дослідження мікроструктури сталі зразки 12 та 10 мм були протравлені в 4 % спиртовому розчині азотної кислоти протягом $t = 10$ с. У результаті було встановлено, що сталь має ферито-перлітну структуру з невеликою кількістю цементиту за гранями зерен (рис. 5), при цьому об'ємна частка перліту невелика. Необхідно зазначити деяку різнозернистість мікроструктури зразка завтовшки 10 мм: разом із зернами бала № 7–8 спостерігаються окремі зерна бала № 4–5 [13]. Структура зразка 12 мм більш однорідна та відповідає балу № 7–8 [13].

При вимірюванні твердості сталі за Віккерсом встановлено, що твердість металу зразка завтовшки 12 мм поступається твердості зразка завтовшки 10 мм: $HV_1 = 1163 \dots 1204$ МПа та $HV_1 = 1377 \dots 1428$ МПа відповідно.

Таким чином, на підставі проведених металографічних досліджень можна зробити висновок, що у зв'язку з тим, що у структурі металу переважають досить дрібні зерна фериту, а дисперсних неметалевих включень, деформованих вздовж напрямку прокатування та розташованих рівномірно між зернами, небагато, слід очікувати достатньо високу пластичність і в'язкість сталі. Фактичний розмір зерна сталі та об'ємна частка перліту мають забезпечити потрібний рівень міцності сталі. Стан постачання сталевого прокату – гарячекатаний.

Результати дослідження механічних властивостей зразка сталі резервуара 1901 р. будівниц-

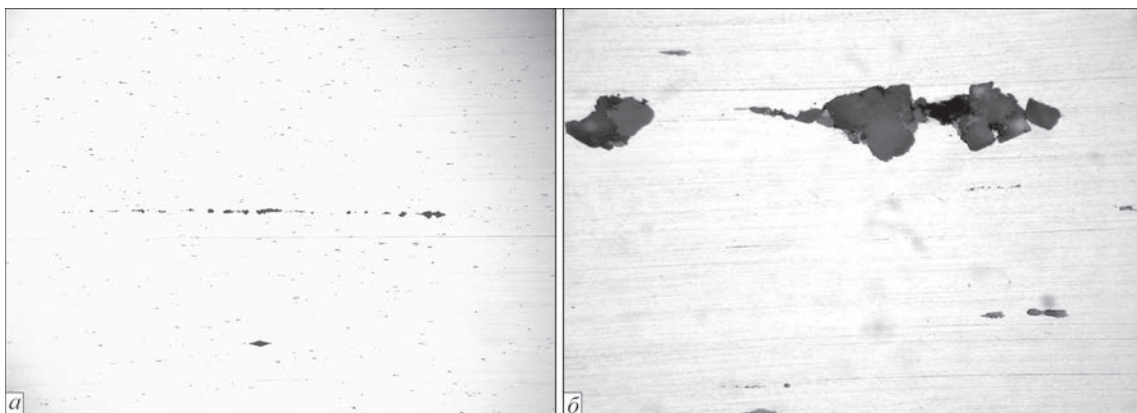


Рис. 3. Складні неметалеві включення $\delta = 10$ мм: $a - \times 100$, $b - \times 1000$



Рис. 4. Мікроструктура сталі, $\delta = 10$ мм: *a* – $\times 100$, *b* – $\times 1000$; *v* – $\delta = 12$ мм, $\times 1000$

тва у співставленні з необхідними механічними властивостями листового прокату вуглецевої сталі ВСтЗсп ГОСТ 380-60 [12], яка використовувалась для відповідальних зварних конструкцій [14], наведено в табл. 3. Аналіз цих даних показує, що з урахуванням результатів випробування поздовжніх зразків міцність і пластичність дослідженої сталі відповідає вимогам, що висуваються ГОСТ 380-60 [12] до сталі ВСтЗсп. Ударна в'язкість дослідженої сталі має достатній рівень при температурі випробування $T = -20$ °С: $KCU > 29$ Дж/см².

Дослідження сталі та її зварних з'єднань стінки резервуара 1929 р. будівництва. Дослідження проводилися для I поясу стінки резервуара завтовшки 15 мм. Хімічний склад сталі наведено в табл. 4. Тут видно, що її марка аналогічна застосованій для стінки резервуара 1901 р. будівництва, але вміст сірки суттєво, удвічі, перевищує допустимі ГОСТ 380-60 [12] значення, а вміст фосфору відповідає вимогам.

Дослідження неметалевих включень показало, що в основному металі спостерігаються переважно сульфіди світло-сірого кольору веретеноподібної форми, витягнуті в напрямку прокату (рис. 5). Довжина цих включень становить 10...75 мкм. Бал забрудненості сульфідами становить 56 [9]. В основному металі також спостерігаються оксисульфіди та пластинчасті силікати у невеликій кількості (рис. 6, *a*), а іноді й ланцюжки оксидів, орієнтовані в напрямку прокату (рис. 6, *b*).

Було встановлено, що структура основного металу – ферито-перлітна (рис. 7, *a, б*), перліт витягнутий вздовж напрямку прокатування. Також

у невеликій кількості спостерігається цементит (рис. 7, *в*), травлення в лужному розчині пікрату натрію). Діаметр зерна фериту становить $d = 80...90$ мкм. Твердість основного металу складає $HV_1 = 1560$ МПа.

Дослідження структури зварного стикового з'єднання показує, що на ділянці перегріву утворюється ферит з дрібнодисперсним перлітом (рис. 8, *a*). По границях зерен спостерігаються виділення невеликої кількості цементиту. Розмір зерна фериту несуттєво збільшується та становить 80...90 мкм. Твердість металу ділянки перегріву дорівнює $HV_1 = 1917$ МПа. Поблизу лінії сплавлення сульфідні включення під впливом зварювального нагріву мають форму, ближчу до овальної. Максимальна довжина сульфідів становить 15...20 мкм (рис. 6, *в*). На ділянці нормалізації структура сталі дещо подрібнюється, її твердість становить $HV_1 = 1800$ МПа. У процесі неповної перекристалізації відбувається деяке подрібнення фериту, сфероїдизація та подрібнення перліту, утворення невеликої кількості цементиту (рис. 8, *б*). Твердість цієї ділянки становить $HV_1 = 1725$ МПа.

Аналіз результатів дослідження мікроструктури зварного з'єднання показує, що збільшення твердості на ділянці перегріву пов'язане з утворенням більш дрібнодисперсного перліту в більшому об'ємі, що рівномірно розташований по площі зерна (рис. 7, *a*, рис. 8, *a*). На ділянці нормалізації та неповної перекристалізації збільшення твердості відбувається переважно за рахунок

Таблиця 3. Механічні властивості сталі, що була застосована для стінки резервуара 1901 р. будівництва

Конструктивний елемент	Механічні властивості сталі				
	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCU_0 , Дж/см ²	KCU_{-20} , Дж/см ²
I пояс, $\delta = 12$ мм*	278,4	386,2	37,3	–	74
	273,1	381,9	40,0		69
II пояс, $\delta = 10$ мм*	–	–	–	122	–
				120	
				118	
Сталь СтЗсп5** [12]	> 240	380...400	> 27	–	> 29**

* Повздовжні зразки. ** Вимоги факультативні.

Таблиця 4. Хімічний склад сталі стінки резервуара 1929 р. будівництва

Товщина металу δ , мм	Вміст хімічних елементів, масова частка %						
	C	Si	Mn	S	P	N	O
15	0,045	<0,05	0,43	0,10	0,05	0,0026	0,027

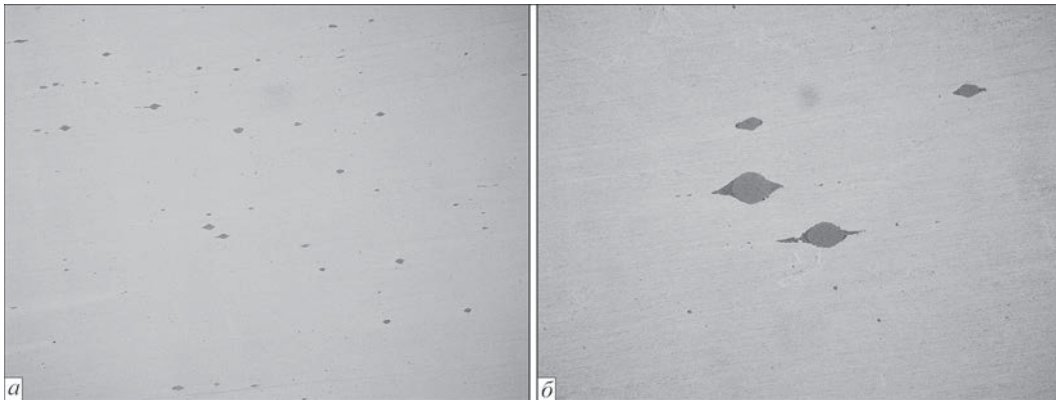


Рис. 5 Сульфіди та оксисульфіди в сталі, $\delta = 15$ мм: а – $\times 100$, б – $\times 500$



Рис. 6. Силікати пластинчасті в сталі: а – $\delta = 15$ мм, $\times 500$; б – ланцюжок оксидів у сталі, $\delta = 15$ мм, $\times 500$; в – сульфіди та оксисульфіди біля лінії сплавлення, $\delta = 15$ мм, $\times 500$

утворення при охолодженні більш дрібнозернистої структури (рис. 8, б).

Загалом аналіз отриманих даних показує, що у зварному з'єднанні дослідженого зразка сталі резервуара 1929 р. будівництва на ділянці крупного зерна немає значного зростання феритних зерен, тут формується достатньо дрібнодисперсна ферито-перлітна структура з невеликою об'ємною часткою перліту. Виділення по границях зерен незначні. Відсутні протяжні неметалеві включення в основному металі та біля лінії сплавлення. Це дає підстави очікувати на достатньо високий рівень в'язкості металу на ділянці крупного зерна та основного металу.

Результати визначення механічних властивостей дослідженої сталі при випробування зразків на розтяг наведено в табл. 5. Аналіз результатів випробувань показує, що міцність сталі практично задовольняє вимогам для сталі 08пс ГОСТ 1050-88 [11].

На другому етапі досліджень ударну в'язкість сталі та ЗТВ визначали на зразках з V-подібним надрізом перерізом 10×10 мм. У [6] зазначено, що на основі оброблення статистичних даних механічних властивостей різних марок сталі, які застосовувалися для суден, що зазнали крихкого руй-

нування, основним критерієм оцінки можливості крихкого руйнування була температура, за якої енергія руйнування за методом Шарпі дорівнювала $KV = 2$ Дж ($KCV = 24$ Дж/см²). Було встановлено, що у випадку зварних суден для досліджених марок сталі (вуглецеві, типу киплячих з відносно низькою ударною в'язкістю) вказана температура випробувань зразків становить $T = +15,5$ °C (60 °F) [6]. Для м. Батумі температура найбільш холодних діб з ймовірністю 98 % становить $T_{0,98} = -4$ °C [15], а для м. Баку $T_{0,98} = -8$ °C [15]. У цих випадках розрахункова температура металу дорівнює $T = +1$ °C (33,8 °F) та $T = -3$ °C (26,6 °F) відповідно [16], що є достатнім для виключення крихкого руйнування стінки з урахуванням товщини поясів [17]. Тобто, з огляду на кліматичний район розташування резервуарів, застосування вищевказаного критерію є достатньо коректним.

З урахуванням неоднорідності механічних властивостей листового прокату, а також для оцінки надійності нижньої границі перехідного інтервалу випробування зразків проводилося для двох значень температури: $T = +15,5$ °C (60°F) і $T = 0$ °C (32 °F). Отриману величину ударної в'язкості основного металу та лінії сплавлення наведено в табл. 6.

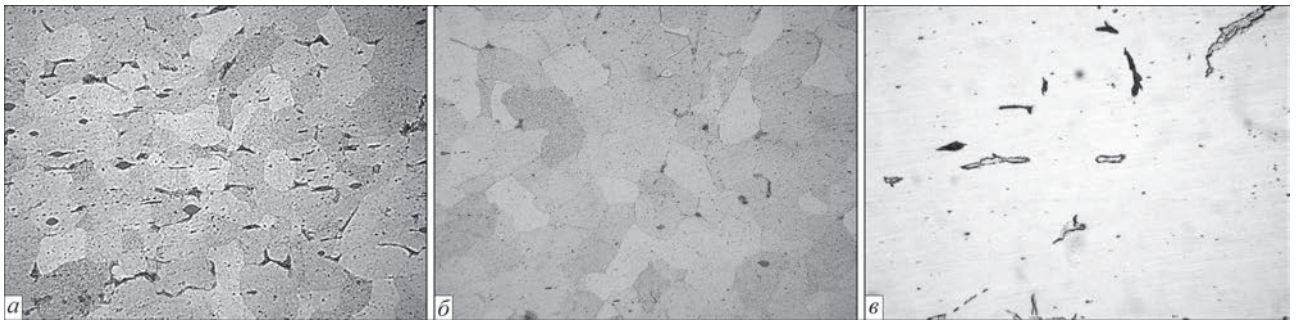


Рис. 7. Мікроструктура основного металу, травлення в ніталі: *a* – $\times 250$, *б* – $\times 500$; *в* – травлення в лужному розчині пікрату натрію, $\times 250$

Аналіз даних табл. 6 показує, що основний метал має достатню в'язкість для уникнення крихкого руйнування при застосуванні зварювання – рівень в'язкості становить $KCV_{+15,5} = 24$ Дж/см² та $KCV_0 = 21$ Дж/см² [6, 17]. Злами зразків за температури випробувань $T = 0$ °С – крихкі, з утяжкою зразків у нижній частині $\approx 0,34$ мм (рис. 9). Висока ударна в'язкість зразків з надрізом по лінії сплавлення (ЛС) пов'язана з присутністю високої частки металу шва, що має значно більшу в'язкість у перерізі руйнування. Візуальне дослідження зламів зразків показує, що метал ЛС не переходить у крихкий стан. Тобто при оцінюванні ударної в'язкості зварного з'єднання, зважаючи на наявну структуру металу ЛС, можна орієнтуватися на показники в'язкості основного металу.

Для оцінювання достатності в'язкості руйнування сталі для попередження крихкого руйнування резервуара було визначено критичну довжину тріщини для I поясу стінки завтовшки 15 мм. На основі значень ударної в'язкості KCV_0 було визначено величину критичної в'язкості руйнування сталі за формулою [19]:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{0,1 \cdot E \cdot KCV}{10^2(1 - \nu^2)}} \quad (1)$$

де K_{Ic} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень для умов навантаження, за яких краї тріщини зміщуються в напрямку нормалі до площини тріщини, МПа $\cdot\sqrt{м}$; E – модуль Юнга, для

сталі $E = 210000$ МПа; KCV – величина ударної в'язкості, $KCV = 20$ Дж/см²; ν – коефіцієнт Пуассона, для сталі $\nu = 0,25$.

У цьому випадку критична довжина тріщини становить [20]:

$$a_{cr} = \frac{\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma \cdot F}\right)^2}{\pi} \quad (2)$$

де σ – напруження, що діють у напрямку нормалі до площини тріщини в I поясі стінки, МПа. Беручи до уваги величину співвідношення $2l/b = 0$ ($2l$ – довжина тріщини, b – ширина пластини), значення функції F приймали $F(0) = 1$ [20].

Напруження σ , що діють у напрямку нормалі до площини тріщини, визначалися згідно з [17] $\sigma = 2/3 \cdot Y = 2/3 \cdot 186$ МПа = 124 МПа, де Y – мінімальна величина границі текучості, що приймалася згідно з табл. 5.

Результати розрахунку критичної довжини наскрізної тріщини для основного металу I поясу, що отримані на основі значень його ударної в'язкості (табл. 6), наведено в табл. 7.

З табл. 7 видно, що критична довжина наскрізної тріщини a_{cr} становить 97 мм. Початкову довжину наскрізної тріщини, з якої починається витік нафти, можливо прийняти як у випадку поверхневої раковини, що має форму напівкола: $2t$, де t – товщина стінки або 2×15 мм = 30 мм [21]. У цьому

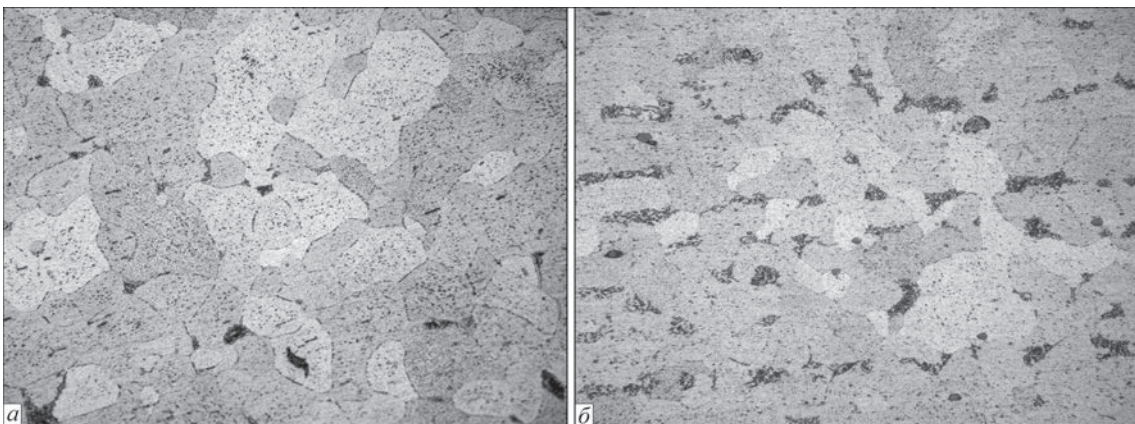


Рис. 8. Мікроструктура ЗТВ, $\times 250$: *a* – ділянка крупного зерна, *б* – ділянка неповної перекристалізації

Таблиця 5. Результати випробувань на розтяг сталі, що була застосована для стінки резервуара 1929 р. будівництва

Конструктивний елемент	Механічні властивості сталі		
	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
І пояс, $\delta = 15,0$ мм*	189	335	38,7
	186	336	40,3
Сталь 08пс [11]	> 196	> 320	> 33

*Поперечні зразки.

випадку до досягнення критичної довжини тріщини повинна збільшитися на 67 мм. Очікувану кількість циклів для досягнення наскрізної тріщини критичної довжини можливо консервативно оцінити як $N = 1000$ [22]. У цьому випадку при запасі $N = 10$ [23] очікувана кількість циклів при наскрізній тріщині становить $N = 100$, що відповідає одному року експлуатації резервуара. За цей термін наскрізний дефект буде гарантовано виявлено при регулярному зовнішньому огляді стінки резервуара, що дозволяє застосувати критерій «витік до руйнування» для гарантування безвідмовної експлуатації резервуарів [21, 23, 24].

Таким чином, особливістю дослідженої марки сталі є низький рівень вуглецю – на рівні 0,045...0,05 % С у поєднанні з частковим розкисленням сталі (напівспокійна), а також підвищений вміст сірки до 0,1%S та вміст фосфору до 0,05 % Р. Це означає, що холодостійкість сталі визначатиметься феритною матрицею, яка має достатній рівень пластичності та в'язкості. Своєю чергою, на енергію руйнування металу також впливають кількість і розміри неметалевих включень [25]. У [26] показано, що для С–Si–Mn сталей збільшення вмісту сірки до 0,1 % суттєво не впливає на нижню границю T_0 критичного інтервалу крихкості. Згідно з отриманими даними (табл. 6) ударна в'язкість сталі становить $KCV_0 = 20$ Дж/см², що забезпечує достатню величину нижньої границі температури переходу T_0 для кліматичних районів, де побудовані резервуари [17].

У випадку зварювання досліджених низьковуглецевих сталей крихке руйнування металу лінії сплавлення відсутнє, що пов'язано з форму-

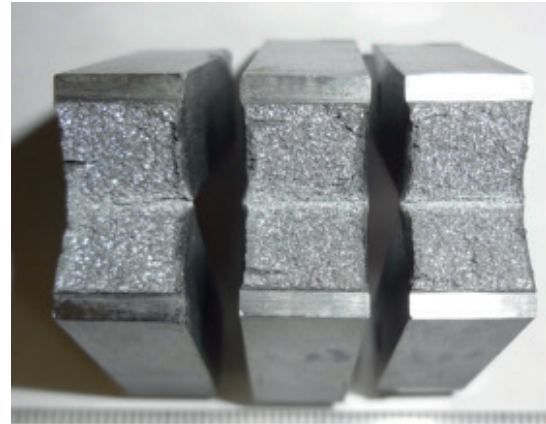


Рис. 9. Злами випробуваних за Шарпі при $T = 0$ °С зразків (І пояс, товщина $\delta = 15$ мм, резервуар 1929 р. будівництва)

ванням в основному феритної структури (низький вміст вуглецю $C \leq 0,05$ %), несуттєвим зростанням розміру зерна фериту та відсутністю виділення крихких фаз по границях зерен у металі ЛС. Усе це забезпечує виключення крихкого руйнування зварних з'єднань досліджених сталей та дає підставу для проведення ремонту клепаных резервуарів із застосуванням зварювання.

Основні технічні рішення, прийняті у процесі ремонту клепаных резервуарів. Резервуар 1901 р. будівництва, $D = 23,40$ м, $H = 9,54$ м. Обстеження технічного стану клепаного резервуару показало необхідність ремонту основи, повної заміни днища та кінцевого покриття резервуара, монтажу в стінці та покритті нових патрубків і люків.

Для підсилення нижньої частини стінки, яка зазнала виразкової корозії, всередині резервуара приварювався бандаж завтовшки 6 мм зі сталі СтЗсп5-св (рис. 10). Проводилося відновлювання основи та монтувалося нове днище: окрайки завтовшки 8 мм і центральна частина завтовшки 6 мм сталі СтЗсп5-св. Зовнішні контурні листи днища залишалися. У стінку врізалися нові люки-лази Ду600 і нові патрубки (рис. 10). Нове кінцеве каркасне покриття з кутом нахилу 6° проектувалося із центральною стійкою Ду500, що закріплювалася до залізобетонного привантаження для запобігання його підймання під дією надлишкового тиску в резервуарі (рис. 10). Головною радіальною балкою

Таблиця 6. Результати випробувань на ударну в'язкість основного металу та лінії сплавлення сталі, застосованої для стінки клепаного резервуара 1929 р. будівництва

Характеристика резервуара	Температура випробування зразків, °С	Ударна в'язкість KCV , Дж/см ²	
		основного металу*	надріз по лінії сплавлення**
t15 мм, № 1	+15,5 (60 °F)	$\frac{24-28-20}{24}$	–
	0 (32 °F)	$\frac{23-20-20}{21}$	$\frac{158-129-125}{137}$
t15 мм, № 2		$\frac{30-20-23}{24}$	–

* Зразки для випробувань на удар за Шарпі вирізалися поперек прокату.
 ** Розташування V-подібного надрізу приймали по лінії сплавлення за поз. 2 [18].

Таблиця 7. Результати розрахунку критичної довжини тріщини для I поясу клепаного резервуара 1929 р. будівництва, основний метал

Ударна в'язкість KCV_0 , Дж/см ²	Коефіцієнт інтенсивності напружень, K_{Ic} , МПа·√м	Напруження розтягу σ , МПа	Критична довжина тріщини a_{cr} , мм
20	67	124	97



Рис. 10. Процес ремонту клепаного резервуара РВС-5000, вигляд із середини



Рис. 12. Ремонтні стрингери, що встановлені в місцях приходу до стінки радіальних балок

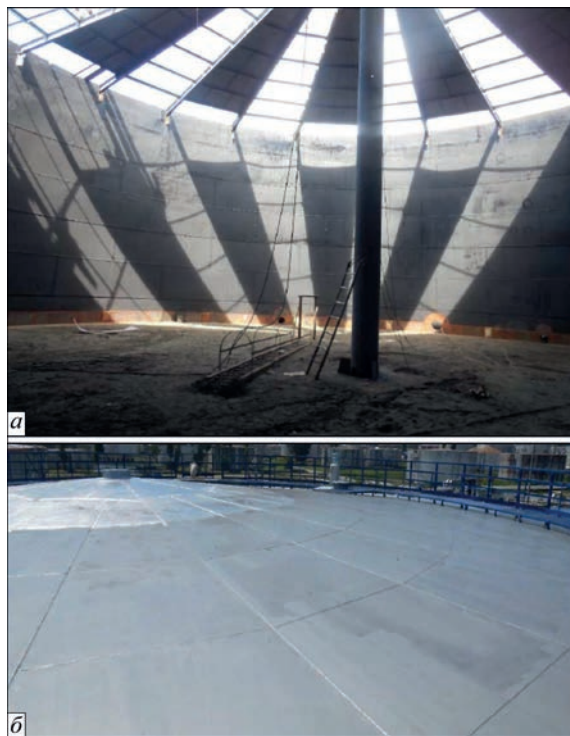


Рис. 11. Ремонт конічного покриття клепаного резервуара РВС-5000: а – монтаж щитів покриття, вигляд із середини; б – змонтоване покриття, вигляд із зовнішньої сторони

служував двотавр № 27, товщина нового настилу становила 4 мм. Обпирали двотаври на стінку через опорні столики, монтаж покриття проводився з використанням заводських щитів, між щитами заводський набір та настил монтувалися розсипом (рис. 11, а, б). Із зовнішньої сторони резервуара місце обпирання радіальних двотаврів на стінку додатково підсилювалося стрингерами у вигляді рівнополичного кутика 100×100×8 мм (рис. 12).



Рис. 13. Демонтаж існуючого днища та покриття резервуара

Для зменшення нагріву металу під час зварювання та можливості отримання сприятливої структури й механічних властивостей металу ЗТВ застосовувалося багатопрхідне зварювання покритими електродами діаметром 3,2 мм.

Після проведення ремонту із застосуванням зварювання була відновлена працездатність резервуара з отриманням максимально можливого рівня його заповнення.

Резервуар 1929 р. будівництва, $D = 30,73$ м, $H = 10,25$ м. У процесі ремонту цього резервуара було проведено ремонт основи, заміну днища, покриття та верхнього поясу стінки (рис. 13). Ухил нового конічного каркасного покриття складав 1:10. Як головну радіальну балку використовували двотавр № 27, який обпирали на стінку через опорний столик завдовжки 0,5 м. Нове конічне покриття спиралося в центрі на балкове кільце із двотавру № 27, що своєю чергою спиралося через каркас із балок на 8 колон із труби Тр.426×8 мм, які встановлювалися на кільцевий залізобетонний фундамент по колу радіусом $R = 7$ м (рис. 14, а, б, 15). Товщина нового настилу покриття стано-



Рис. 14. Монтаж конічного покриття з обпиранням у центрі: вигляд зсередини резервуара (а), вигляд із зовнішньої сторони резервуара (б)



Рис. 15. Влаштування кільцевого залізобетонного фундаменту для опорних колон покриття



Рис. 16. Монтаж нового днища: окрайка завтовшки 8 мм, центральна частина – завтовшки 6 мм

вила 4 мм. При відновлюванні днища проводили демонтаж його центральної частини, залишивши по периметру сегмент окрайки, що прилягає до стінки, завдовжки 600 мм. Відновлювалася основа та монтувалося нове днище: окрайка завтовшки 8 мм, центральна частина завтовшки 6 мм зі сталі СтЗсп5-св (рис. 16). Внаслідок інтенсивної виразкової корозії верхній сьомий пояс стінки заввишки 1400 мм замінювався на новий завтовшки 6 мм також зі сталі СтЗсп5-св. З метою збереження проектної геометричної форми верхніх поясів стінки на шостому поясі попередньо монтувалося кільце жорсткості з труби квадратного перерізу $80 \times 80 \times 4$ мм (рис. 17). У стінці для зручності обслуговування влаштовувалися нові овальні люки-лази 600×900 мм і круглі Дуб00, а патрубки замінялися на нові ПРП (рис. 18, а, б).



Рис. 17. Заміна верхнього поясу стінки з установкою фіксуючого кільця жорсткості

Проведений ремонт резервуара у вищезазначених обсягах дозволив відновити проектний рівень наливу нафти (рис. 19).

Для зварювання стикових швів стінки використовувався процес 135 в суміші М21-АгС-18 дротом типу G3Si1 діаметром 1,2 мм. Особлива увага при проведенні ремонту приділялася неруйнівному контролю ремонтних стикових зварних швів у першому поясі – усі ремонтні стикові шви були проконтрольовані по всій довжині ультразвуковим методом згідно з вимогами СНиП 3.03.01-87 [27]. Під час проведення візуально-вимірального контролю ремонтних швів глибина підрізів допускалася не більше 0,5 мм. Допуск зварників до зварювальних робіт проводився за позитивними результатами випробування допускних стиків. Сукупність вказаних вище організаційно-технічних заходів дозволила забезпечити високу якість зварних швів і гарантувати відсутність таких небезпечних протяжних тріщиноподібних дефектів, як непровари по крайці та у корні шва, шлакові включення, а також підрізи, що можуть бути місцем ініціації крихкого руйнування.

Після успішного гідровипробування резервуари були введені в експлуатацію. Тривала експлуатація відновлених ємностей (понад 10 років) показала, що технічні рішення, розроблені на основі проведених досліджень щодо можливості застосування зварювання для ремонту клепанних резервуарів, можуть забезпечити достатньо надійну їхню



Рис. 18. Вварювання в стінку овального люка – лазу (а) та патрубка ПРП (б)



Рис. 19. Вигляд резервуара після ремонту в процесі нанесення протикорозійного покриття

подальшу експлуатацію з максимально допустимими рівнем наливу нафтопродуктів.

Висновки

Сталь, що була застосована для будівництва досліджених клепанних резервуарів, є низьковуглецевою із вмістом вуглецю 0,05 % С і манганом 0,4...0,5 % Mn, яку можна віднести до напівспокійної.

Хоча вміст сірки в сталі може досягати 0,1 % S, за наявної структури сталі та її ЗТВ, що в основному складається з фериту, а протяжні легкоплавкі сульфідні та виділення фаз по границях зерен відсутні, холодостійкість дослідженої сталі та її зварних з'єднань задовольняє умові виключення крихкого руйнування у випадку зварних сталевих конструкцій: робота удару $KV \geq 20$ Дж ($KCV \geq 24$ Дж/см²) при температурі випробувань зразків $T = +15,5$ °C (60 °F), яка відповідає кліматичному району розташування резервуарів.

Розрахунковий мінімальний розмір дефекту за ударної в'язкості сталі $KCV_0 = 20$ Дж/см² є достатнім для використання для ремонтних стикових зварних з'єднань стінки критерію «витік до руйнування», що дозволяє застосовувати зварювання при ремонті клепанних резервуарів і забезпечує їхню наступну тривалу безаварійну експлуатацію після ремонту.

Для визначення можливості проведення ремонту клепанних резервуарів із застосуванням зварювання необхідно проводити комплексне дослідження фізико-механічних властивостей сталі та її ремонтних зварних з'єднань спеціалізованими організаціями. Технологія зварювання має забезпечувати мінімальну погонну енергію, що максимально обмежує зростання розміру зерна та запобігає утворенню фаз на границях зерен.

Для ремонтних стикових зварних з'єднань стінки потрібно проводити ультразвуковий контроль якості по всій їх довжині. Особливу увагу необхідно приділяти виявленню протяжних площинних дефектів по крайці або в корені шва.

Для ремонтних стикових зварних з'єднань стінки потрібно проводити ультразвуковий контроль якості по всій їх довжині. Особливу увагу необхідно приділяти виявленню протяжних площинних дефектів по крайці або в корені шва.

Список літератури

1. https://az.wikipedia.org/wiki/Bak%C4%B1_neft-qaz_rayonu
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Branobel>
3. Ергин Д. (2011) *Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть*. Пер. с англ. М., Альпина Паблишер.
4. <http://www.transneft.ru/About/History/>
5. (1990) *Металлические конструкции* академика В.Г. Шухова. Отв. ред. В.П. Мишин. М., Наука.
6. Бойд, Дж. М. (1977) *Практические примеры проектирования конструкций судов. Разрушение. Т. 5. Расчет конструкций на хрупкую прочность*. Пер. с англ. под. ред. Г. Либовца. М., Машиностроение.
7. ГОСТ 1497-84 *Металлы. Методы испытаний на растяжение* (ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88)
8. ГОСТ 9454-78 *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах*.
9. ГОСТ 1778-70 *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений* (ИСО 4967-79)
10. ГОСТ 5640-68 *Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты*.
11. ГОСТ 1050-88 *Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь*.
12. ГОСТ 380-60 *Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и общие технические требования*.
13. ГОСТ 5639-82 *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. С изм. № 1*.
14. СНиП II В.3-62 *Строительные нормы и правила. Часть II, раздел В. Глава 3. Стальные конструкции, нормы проектирования*.
15. СНиП 2.01.01-82 *Строительная климатология и геофизика*.
16. prEN 14015:2004 *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above*.
17. (2014) *API Standart 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction – Fifth edition*.

18. MSC.177(79) *Code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk. Chapter 6. Materials of construction.*
19. Гиренко В.С., Дядин В.П. (1985) Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения δ_{1c} , R_{1c} конструкционных сталей и их сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **9**, 13–20.
20. Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х. (1986) *Вычислительная механика разрушения*. М., Мир.
21. Брок Д. (1980) *Основы механики разрушения*. Пер. с англ. М., Высшая школа.
22. Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П. (2016) О возможности предотвращения лавинных разрушений стенки цилиндрических резервуаров для хранения нефти путем применения листовой стали с повышенным значением ударной вязкости. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 44–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.02.05>
23. Кныш В.В., Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П., Яшник А.Н. (2012) Обоснование критерия «течь перед разрушением» применительно к вертикальным цилиндрическим резервуарам для хранения нефти. *Автоматическая сварка*, **9**, 29–33.
24. Bourga, R., Moore, P., Janin, Y.-J., Wang, B., Sharples, J. (2015) Leak-before-break: Global perspectives and procedures. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **129-130**, 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.02.004>
25. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. (1985) Специальные стали. М., Металлургия.
26. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Рудченко А.В. (2002) *Строительная сталь*. М., Металлургиздат.
27. СНиП 3.03.01-87 *Несущие и ограждающие конструкции*.
10. GOST 5640-68. *Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and strips* [in Russian].
11. GOST 1050-88. *High-quality and high-quality steel. Rolled and shaped products, calibrated steel* [in Russian].
12. GOST 380-60. *Carbon steel of ordinary quality. Grades and general technical requirements* [in Russian].
13. GOST 5639-82. *Steels and alloys. Methods for detecting and determining grain size. With amendment No. 1* [in Russian].
14. SNiP II B.3-62. *Construction norms and rules. Part II, section B. Chapter 3. Steel structures, design standards* [in Russian].
15. SNiP 2.01.01-82. *Building climatology and geophysics* [in Russian].
16. prEN 14015:2004 *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above.*
17. (2014) *API Standart 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction – Fifth edition.*
18. MSC.177(79). *Code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk. Chapter 6. Materials of construction.*
19. Hireenko, V.S., Dyadin, V.P. (1985) Dependence between impact toughness and fracture mechanics criteria δ_{1c} , R_{1c} of structural steels and their welded joints. *Avatomatycheskaia svarka*, **9**, 13–20 [in Russian].
20. Shiratori, M., Miyoshi, T., Matsushita, H. (1986) *Computational fracture mechanics*. Moscow, Mir [in Russian].
21. Broek, D. (1980) *Fundamentals of fracture mechanics*. Trans. from Engl. Moscow, Vysshaya shkola [in Russian].
22. Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P. (2016) On possibility of prevention of avalanche-like fractures of the wall of cylindrical tanks for oil storage by application of sheet steel with increased values of impact toughness. *Tekhnicheskaya dyahnostyka i nerazrushaiushchii kontrol*, **2**, 44–49 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.02.05>.
23. Knysh, V.V., Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P., Yashnik, A.N. (2012) Substantiation of «leak-before-break» criterion for vertical cylindrical tanks for oil storage. *The Paton Welding J.*, **9**, 26–29.
24. Bourga, R., Moore, P., Janin, Y.-J., Wang, B., Sharples, J. (2015) Leak-before-break: Global perspectives and procedures. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **129-130**, 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.02.004>
25. Goldshtein, M.I., Grachev, S.V., Veksler, Y.G. (1985) *Special steels*. Moscow, Metallurgy [in Russian].
26. Skorokhodov, V.N., Odessky, P.D., Rudchenko, A.V. (2002) *Construction steel*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
27. SNiP 3.03.01-87. *Supporting and enclosing structures* [in Russian].

References

1. https://az.wikipedia.org/wiki/Bak%C4%B1_neft-qaz_rayonu
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Branobel>
3. Yergin, D. (2011) *Extraction: A global history of the struggle for oil, money, and power*. Transl. from Engl. Moscow, Alpina Publisher [in Russian].
4. <http://www.transneft.ru/About/History/> [in Russian]
5. (1990) *Metal structures of academician V.G. Shukhov*. V.P. Mishin (Ed.). Moscow, Nauka [in Russian].
6. Boyd, J.M. (1977) *Practical examples of ship structural design. Failure. Vol. 5. Brittle strength analysis of structures*. Trans. from Engl. G. Libovets (Ed.). Moscow, Mashinostroyeniye [in Russian].
7. GOST 1497-84. *Metals. Tensile test methods (ISO 6892-84, СТ ПЕВ 471-88)* [in Russian]
8. GOST 9454-78. *Metals. Method of impact bending test at low, room and elevated temperatures* [in Russian].
9. GOST 1778-70. *Steel. Metallographic methods for the determination of non-metallic inclusions (ISO 4967-79)* [in Russian].

RESTORATION OF RIVETED CYLINDRICAL TANKS BY USING WELDING

A.Yu. Barvinko, Yu.P. Barvinko, A.M. Yashnyk, O.S. Kostenevych

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: tanksweld@gmail.com

As a result of the conducted research, it was found that low-carbon steel with content of 0.045-0.05%C and 0.4...0.5Mn was used for the shell of riveted tanks. Taking into account the nitrogen content at the level of 0.003%N and oxygen 0.03%O at a low carbon level, the studied steel may be considered as semikilled. The sulphur content in the steel can reach 0.1%S. However, taking into account that the structure of the base metal and the HAZ is mainly represented by a sufficiently fine-grained ferrite the impact energy of the steel at $T = + 15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (60 °F) satisfies the condition $KV_{\min} = 20 \text{ J}$, embrittlement of the overheated zone metal is not observed. This indicates the possibility of sufficiently eliminating brittle fracture of welded joints of the specified steel and restoring the riveted tanks using welding. Based on the conducted studies, technical solutions for the complete (partial) replacement of riveted metal structures with welded ones were developed and tested during the repair of tanks after 114 years and 86 years of their operation: bottom, replacement of part of the shell, welding in pipes into the shell and installing a new roof. Successful operation for 10 years with the maximum level of oil product filling of the restored riveted tanks confirmed the correctness of the decisions made. 27 Ref., 7 Tabl., 19 Fig.

Keywords: low carbon steel, weldability, brittle fracture, welded structures, riveted tank, repair

Отримано 12.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 23.10.2025

Прийнято 27.12.2025