

УДК 614.841.45

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-92-103>

М.М. Несух
А.В. Субота
А.В. Швиденко
О.О. Іваненко

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ВІДРИВІ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ВІД ДНИЩА ПІД ЧАС ПОЖЕЖИ

Мета. Розробка методики експериментальних досліджень зварного з'єднання резервуару, як найбільш слабого елемента, руйнування якого спричиняє відрив корпусу резервуара від днища та дослідження, на її основі, механічних характеристик зварних з'єднань за результатами проведених випробувань.

Методика досліджень. Експериментальні дослідження включали випробування на статичний розтяг, для чого використовувались зразки із зварним з'єднанням зі сталі Ст3сп. Зразки виготовляли з сталюго прутка розмірами в перерізі 8×8 мм із розрізанням на заготовки довжиною 85 мм. Зварювання заготовок з сталі Ст3сп виконувалось за допомогою дугового зварювання. Для тестування конструкційних матеріалів на розтяг використовувалась універсальна розривна машина Р-10. В результаті випробувань було побудовано 12 графіків для кожного випробувального зразку, які були узагальнені у спільні графіки по типам зразків. Перевірка результатів досліджень включала аналіз на наявність викидів та квазивикидів за критерієм Грabbса.

Результати досліджень. За результатами візуального огляду по закінченню експерименту виявлено, що зразки I та II типів руйнувались у місці зварного з'єднання. Було розроблено методику експериментальних досліджень зварного з'єднання резервуару, як найбільш слабого елемента, руйнування якого спричиняє відрив корпусу резервуара від днища. Було отримано механічні характеристики зразків зварювальних з'єднань: межа текучості у діапазоні 240-300 МПа; модуль пружності 190-240 ГПа; модуль зміцнення 18-20 ГПа та гранична пластична деформація 0.00334. Проаналізована адекватність отриманих експериментальних даних у результаті чого встановлено, що експериментальні дані є адекватними, а середня відносна похибка є не більше за 7 %. Для порівняння отриманих експериментальних даних було побудовано узагальнену діаграму деформування. Були визначені відповідні параметри, які встановлюють механічні властивості зварного шва.

Наукова новизна. Вперше була розроблена та застосована методика експериментальних досліджень міцності зварних з'єднань при відриві корпусу вертикального сталюого резервуару від днища під час пожежі.

Практичне значення. Отримані дані можна використовувати для математичного моделювання поведінки зварних з'єднань сталюих вертикальних резервуарів по зберіганню нафтопродуктів при пожежі.

Ключові слова. Сталюві резервуари, зварне з'єднання, нафтопродукти, пожежа, випробування на статичний розтяг.

Вступ.

Пожежі на об'єктах з резервуарами, що містять нафтопродукти, можуть швидко набувати значних масштабів і поширюватися різними способами, такими як вибух резервуарів, вибух пароповітряних хмар, розливи легкозаймистих рідин або газів, спінення та викид нафтопродуктів, тепловий вплив від палаючих резервуарів, пожежі по трубопроводах, дихальних трубах, випромінювання тепла, а також поширення вогню через промислові каналізаційні системи.

Гасіння таких пожеж ускладнюється через виділення великої кількості теплової енергії під час горіння, що призводить до нагрівання сусідніх резервуарів, обладнання та установок.

Актуальність статті обумовлена тим, що руйнування резервуарів під час вибуху часто

супроводжується відривом корпусу від днища з подальшим можливим його польотом на значну відстань. Наприклад, під час вибуху РВС-5000 корпус відлетів приблизно на 50 м, вибух РВС-700 призвів до відльоту корпусу на 25 м, а вибух РВС-3000 спричинив перекидання корпусу без польоту. Ці випадки вказують на порушення співвідношення міцності між слабким швом між дахом та корпусом та сильним швом між корпусом та днищем. Через помилки на етапах проектування, виготовлення або експлуатації резервуара, слабкий шов виявляється міцнішим за сильний, що і призводить до польоту не даху, а корпусу разом з ним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відповідно до чинних норм і правил [1] до складу нафти та нафтопродуктів

входить комплекс технологічних будівель, споруд і установок, призначених для приймання, зберігання і видачі нафти і нафтопродуктів, а також підсобно-виробничі і побутові будівлі і споруди, що забезпечують її нормальну експлуатацію.

Близько 90% зареєстрованих пожеж та загорянь сталося на резервуарах, заповнених нафтою (більше половини) та бензином. Випадки пожеж у резервуарах з дизельним паливом та газом відбуваються не часто. Нерідко відбуваються пожежі та вибухи у резервуарах із мазутом. Приблизно половина всіх пожеж відбувається на працюючих резервуарах [2-3]. З усіх зафіксованих випадків руйнувань резервуарів вертикального сталевого конструкційного типу (РВС), 46,4% призвели до масштабних пожеж з постраждалими. Серед них, 6,4% руйнувань резервуарів сталися безпосередньо через вплив високих температур і тисків. Механізм руйнування РВС є складним і недостатньо дослідженим.

Варто зазначити, що за даними експертних досліджень, руйнування РВС відбувається переважно через пошкодження найбільш навантаженого конструктивного елемента – вузла з'єднання стінки резервуара з його днищем [4]. Основні вимоги щодо зварювання конструктивних елементів вертикальних резервуарів описані у значній кількості Державних стандартів [5-6].

Мета дослідження.

Розробка методики експериментальних досліджень зварного з'єднання резервуару, як найбільш слабого елемента, руйнування якого спричиняє відрив корпусу резервуара від днища та дослідження, на її основі, механічних характеристик зварних з'єднань за результатами проведених випробувань.

Виклад основного матеріалу.

Для дослідження та якісного контролю зварних з'єднань, а також для технічного діагностування, широко застосовуються різноманітні методи руйнівних випробувань. Ці методи можна умовно поділити на кілька категорій:

- статичні, циклічні та динамічні випробування металів, які дозволяють оцінити міцність і стійкість матеріалів за різних умов навантаження;

- методи визначення опору руйнуванню, що дають можливість

встановити відповідність матеріалів певним стандартам і вимогам щодо міцності та довговічності;

- методи визначення модулів пружності і спеціальні випробування, які дозволяють оцінити еластичні властивості матеріалів та їх здатність протистояти руйнуванню в різних умовах.

Для експериментальних досліджень на статичний розтяг використовувались зразки зі сталі СтЗсп, яку часто застосовують при виготовленні вертикальних наземних резервуарів для зберігання нафтопродуктів. СтЗсп є вуглецевою сталлю звичайної якості, яка використовується для виготовлення несучих елементів зварних та незварних конструкцій і деталей. Хімічний склад сталі СтЗсп відповідає вимогам стандарту [7]. Основні механічні характеристики сталі приведено у табл. 1.

Таблиця 1. Механічні характеристики сталі СтЗсп.

Межа міцності, R_m (МПа), N/mm^2	Мінімальна межа текучості, ReH (МПа)				Мінімальне відносне подовження σ_r , %		
	<20	20-40	40-100	>100	<20	20-40	>100
370-480	245	235	225	205	26	25	23

Зразки виготовляли з сталюгого прутка (СтЗсп) розмірами в перерізі 8×8 мм із розрізанням на заготовки довжиною 85 мм. Розрізання металевго прутка на заготовки виконувалось за допомогою ручної кутової шліфувальної машини Bosch Professional GWS 750-125 із використанням диску для різання металу. В подальшому дві заготовки зварювались в суцільний зразок довжиною 180 мм із товщиною зварного шва 10 мм. Загальний вигляд зразку приведено на рис. 1.

Зварювання заготовок з сталі СтЗсп виконувалось за допомогою дугового зварювання із використанням обладнання, що приведено в табл. 2.

Зварювання заготовок у суцільний зразок включало декілька етапів.

1. Підготовка обладнання та матеріалів до використання включає підготовку інверторного зварювального апарату, електродів відповідного діаметру (3 мм), захисних засобів (зварювальна маска, рукавиці, одяг зварювальника) та інше необхідне обладнання.

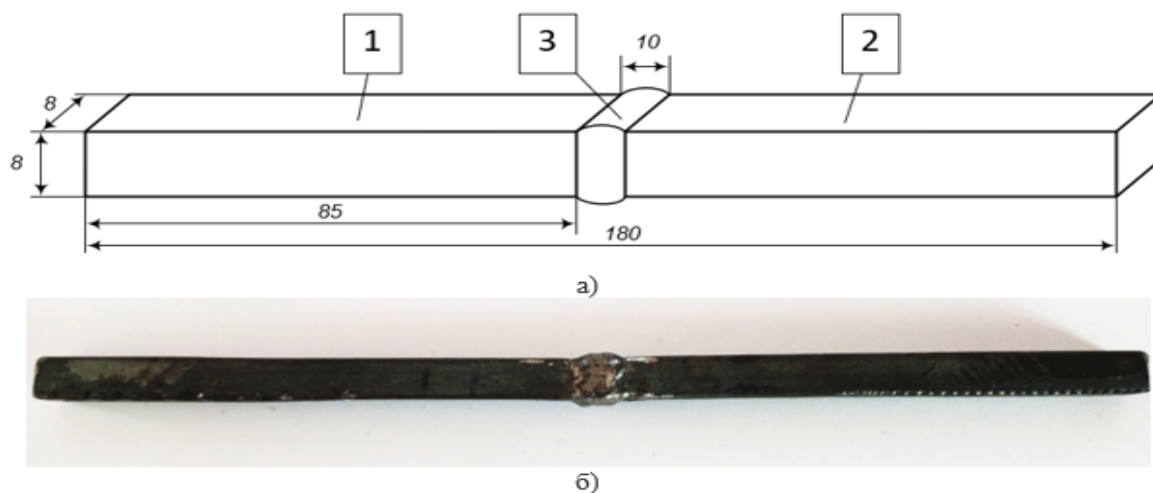


Рис. 1. Експериментальний зразок: а) схематичний вигляд експериментального зразка (1, 2 – заготовки з сталюого прутка; 3 – зварний шов); б) загальний вигляд зразка.

Таблиця 2. Зварювальне обладнання, що використовувалось для виготовлення експериментальних зразків.

№	Назва обладнання	Основні технічні характеристики
1.	Зварювальний інверторний апарат Tesla Weld MMA 350.	1. Діаметр електрода: 1.6 - 2.0 - 3.0 - 4.0 - 5.0 - 6.0 мм. 2. Зварювальний струм мін.: 20 А. 3. Зварювальний струм макс.: 350 А. 4. Тривалість ввімкнення: 80%. 5. Напруга холостого ходу: 61 В. 6. Робоча напруга на дузі: 20,1 – 30,4 А. 7. Джерело енергії для зварювання -електрична дуга.
2.	Електроди зварювальні АНО-21 Ø3.	1. Діаметр: 3мм. 2. Довжина: 35 мм. 3. Тимчасовий опір розриву: ≥ 450 МПа. 4. Межа текучості, ≥ 380 МПа. 5. Відносне видовження, $\geq 18\%$
3.	Захисні засоби: захисна маска S777 MOST Black, рукавиці.	Захисна маска: 1. Поле зору: 98 x 43 мм. 2. Кількість датчиків виявлення дуги: 4. 3. Ступінь затемнення в темному стані: 9-13. Захисні рукавиці: 1. Зносостійкість (від 0 до 4): 4 2. Матеріал: основа - шкіра 100%; підкладка - поліестер 100% 3. Стійкість до розривів (від 0 до 4): 3.

2. Підготовка поверхні, яка передбачала очищення зварювальних країв прутків від оксидів та інших забруднень.

3. Налаштування зварювального апарату передбачало підбір потрібних параметрів. Для зварювання сталі Ст3 з електродом діаметром 3 мм, на основі рекомендацій (в межах 70-100 А), було налаштовано струм 80 А.

4. Виконання зварювання, під час якого були дотримані вимоги:

- переміщення електроду здійснювалось вздовж зварювального шва, зберігаючи постійну відстань між електродом і робочою поверхнею 2-3 мм;
- з метою створення рівномірного шву рух здійснювався рівномірно;
- забезпечення зливання металу відбувалось з обох сторін шва.
- після завершення зварювання залишковий шлак прибирався.

5. Контроль якості вбачав перевірку зварного шву на наявність дефектів, таких як тріщини, пустот та інших недоліків зварювання.

Для тестування конструкційних матеріалів на розтяг використовують спеціальні пристрої, такі як універсальні розривні машини [8]. У розривних машинах є спеціальні фіксатори, в яких закріплюють випробувальний зразок, що піддається дії поступово зростаючого навантаження, а також прилади для вимірювання діючого на зразок зусилля та величини деформації. Для визначення механічних характеристик матеріалів використовуються розривні машини різних розмірів і параметрів, призначені для навантажень від десятків часток ньютон до кілоньютон.

На рис. 2. показано зовнішній вигляд універсальної розривної машини Р-10, яка використовувалась для тестування досліджуваних зразків. Універсальні розривні машини Р-10 призначені для статичних стандартних випробувань зразків металів на розтяг, стиснення та вигин.

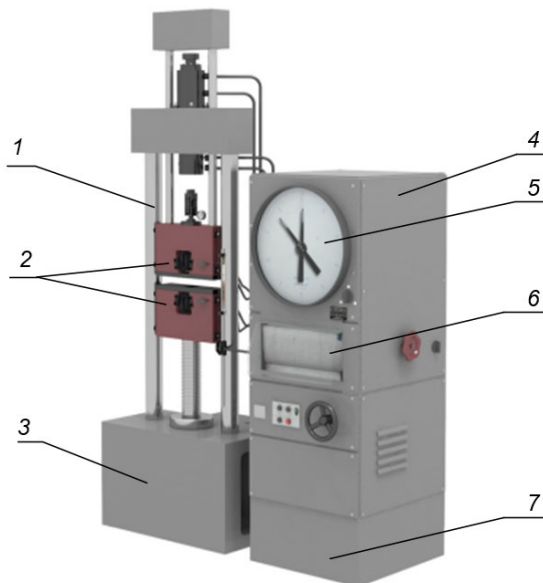


Рис. 2. Зовнішній вигляд універсальної випробувальної розривної машини Р-10: 1 – колони; 2- захоплювачі 3 – силова частина, нижня рухома траверса; 4 – пульт керування; 5 – силовимірювач; 6 – механізм самописця; 7 – насосна установка.

Машина (рис. 2.) є установкою, що складається з навантажувального пристрою та пульта управління. Пристрій навантажувальний призначений для

деформування та руйнування випробуваного зразка. Пульт керування служить для керування процесом навантаження зразка та контролю за величиною навантажень та деформацій. Пульт керування включає насосну установку із системою управління, силовимірювач та діаграмний апарат для запису діаграми "навантаження – деформації". Пристрій навантажувальний та пульт управління монтується на фундаменті та з'єднуються трубопроводами.

Особливості машин Р-10:

- ручне керування процесом навантаження;
- гідравлічна система створення навантаження;
- візуалізація дійсного та максимального значення навантаження на
- аналоговий циферблат;
- автоматична підтримка швидкості навантаження;
- запис параметрів випробування - самописець діаграмний стрічковий;
- тип силовимірювача – торсійний гідравлічний тридіапазонний;
- модульна конструкція: модуль із задаванням сили електрогідравлічний
- шафа управління;
- вертикальне двоколонне двозонне виконання силової рами;
- цільнолиті траверси з вбудованим силовим гідроциліндром;
- станина з вбудованим електроприводом переміщення нижнього захоплення;
- висока жорсткість силової рами.

При випробуванні металу на статичний (короткочасний) розтяг визначались наступні характеристики механічних властивостей:

- межу текучості фізичну σ_T , МПа (кгс/мм²), або умовну $\sigma_{0,2}$ МПа (кгс/мм²);
- тимчасовий опір σ_B , МПа (кгс/мм²);
- відносне подовження після розриву δ_5 , %;
- відносне звуження після розриву ψ , %.

Випробування проводилось для металу шва та металу різних ділянок зони термічного впливу наплавленого металу при зварюванні плавленням.

Форма і розміри зразків, застосовуваних для випробування, відповідали вказаним характеристикам (рис. 1) Допускалось збільшення розміру перерізу зразка і його висоти на 10%. Передбачалось випробування зразків у кількості 12 шт. (4 партії по 3 шт.) Робочий перетин усіх зразків

повністю складався з металу випробуваної ділянки.

Переконавшись у справності машини, вибирався потрібний діапазон вимірювання навантажень, виходячи з розмірів зразка, що випробовувався. При цьому було досягнуто умови, щоб максимальне вимірюване при випробуванні зусилля знаходилося у третій чверті відповідної шкали навантажень. Очікуване максимальне зусилля, що вимірювалось визначалось шляхом розрахунку.

Підготовка та проведення випробувань проводилась у наступній послідовності:

- підключення машину до електромережі;
- встановлення пакетного вимикача у положення "ввімкнено";
- встановлення максимального діапазону навантажень;
- увімкнення двигуна насосної установки;
- встановлення досліджуваного зразку у захоплювачі розривної машини (рис. 3 а);



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Етапи проведення випробування на статичний розтяг сталевих зразків із зварним швом: а) встановлення зразку; б) початок випробування; в) процес випробування із фіксуванням результатів діаграми за допомогою самозаписувального пристрою. г) руйнування зразку, закінчення випробування.

- встановлення потрібного діапазону навантажень (без перемикання, коли машина під навантаженням);

- встановлення маховика регулятора швидкості у потрібне положення;

- навантаження зразку до руйнування чи потрібної деформації поворотом маховичка регулятора швидкості за годинниковою стрілкою (рис. 3 б, в, г);
- для приведення в дію діаграмного апарату барабан знімався з штатного місця з подальшим встановленням діаграмної стрічки;
- під час холостого ходу рухомих частин машини зображувалась вісь деформацій на діаграмній стрічці, при цьому стрілку шкали встановлювали на "нуль".
- перо підіймалось із встановленням необхідного вантаження на зразок спостерігаючи за записом діаграми (рис. 3 в);
- після руйнування зразка або доведення навантаження до величини, заданої умовами випробувань, перо піднімалось (рис. 3 г).
- по закінченню випробувань скидалось мастило з гідросистеми маховиком та вимикалась насосна установка.

Обробка результатів випробувань металевих зразків на статичний розтяг включав кілька кроків, які допомагають зрозуміти механічні властивості матеріалу. Згідно [9] обробка результатів проводилась в декілька етапів, перелік яких приведено нижче.

1. Збір даних. Запис параметрів випробування, таких як розмір зразка, прикладена сила, відносна деформація, час випробування тощо.

2. Побудова кривої напруги-деформації. Графік, який показує взаємозв'язок між напругою, що застосовується до зразка, і зміною його довжини під час розтягу.

3. Визначення механічних властивостей. На основі кривої напруги-деформації визначаються такі властивості, як межа текучості, межа міцності, модуль Юнга та ін.

4. Аналіз тріщин та руйнувань. Вивчення місця руйнування зразка для розуміння причин виникнення тріщин і згинів.

5. Статистичний аналіз. У випадках, коли випробування проводяться на багатьох зразках, важливо здійснити статистичний аналіз результатів для отримання більш точних даних про властивості матеріалу.

6. Порівняння отриманих результатів з вимогами стандартів або специфікацій, щоб забезпечити відповідність властивостей матеріалу.

Результати експериментальних досліджень було проаналізовано та верифіковано. Фото загального вигляду зразків по завершенню випробування зображено на рис. 4. та 5.

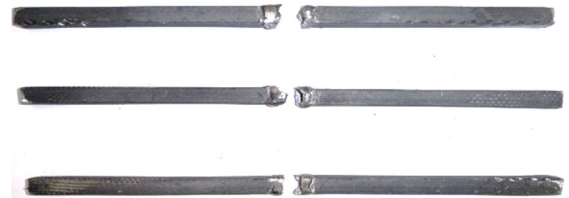


Рис. 4. Вигляд зразків I типу (міцний шов) після випробувань.

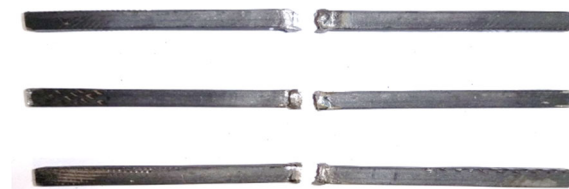


Рис. 5. Вигляд зразків II типу (полегшений шов) після випробувань.

За результатами візуального огляду виявлено, що зразки I та II типів руйнувались у місці зварного з'єднання. Відмінністю результатів для I та II типів є прикладене навантаження та тривалість випробувань по часу.

Під час випробування використовувався спеціальний пристрій (рис. 3 в), який фіксував довжину зразка перед початком навантаження та під час його подовження. Потім різниця між початковою та кінцевою довжиною зразка вимірювалась для кожного значення прикладеної сили. Видовження вимірювалось, як абсолютна величина до початкової довжини зразка.

В результаті випробувань було побудовано 12 графіків для кожного випробувального зразка, які були узагальнені у спільні графіки по типам зразків. Залежності прикладеного навантаження від відносного видовження (6 кривих) та усереднені залежності за тими ж параметрами з межами відхилень для I типу зразків приведені на рис. рис. 6, 7 та для II типу зразків приведені на рис. рис. 8, 9. відповідно.

Полегшені та міцні зварні з'єднання можуть руйнуватися по-різному в залежності від багатьох факторів, включаючи матеріал,

методи зварювання, середовище експлуатації та навантаження, яким вони піддаються.

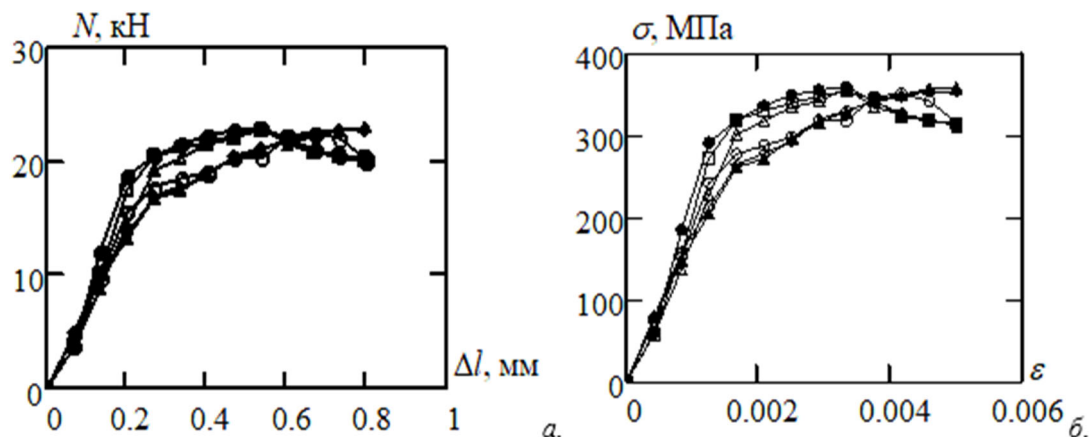


Рис. 6. Залежності прикладеного навантаження від видовження (а) та напруження від відносної деформації (б) (6 кривих) для I типу зразків.

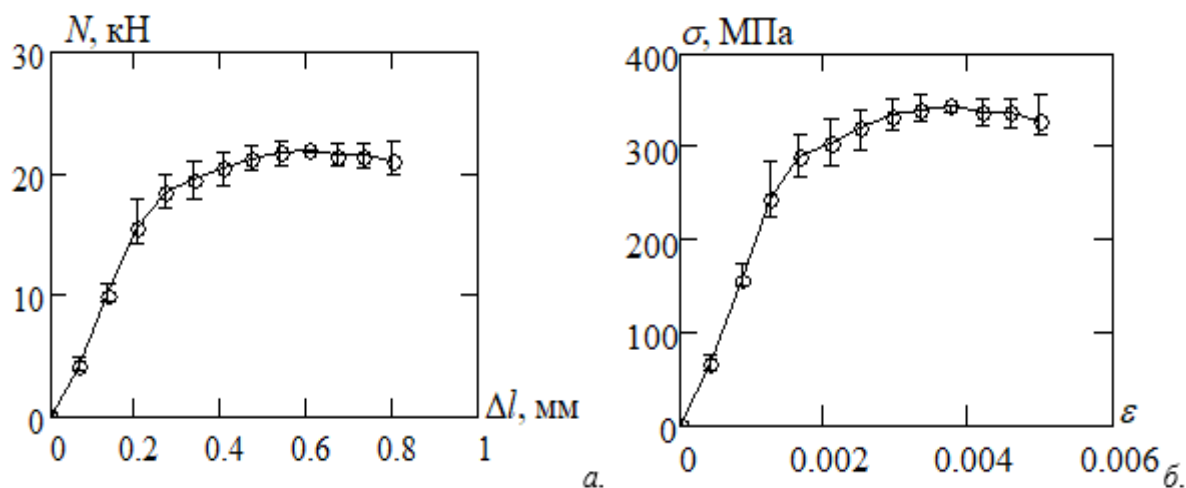


Рис. 7. Усереднені залежності прикладеного навантаження від видовження (а) та напруження від відносної деформації (б) з межами відхилень для I типу зразків.

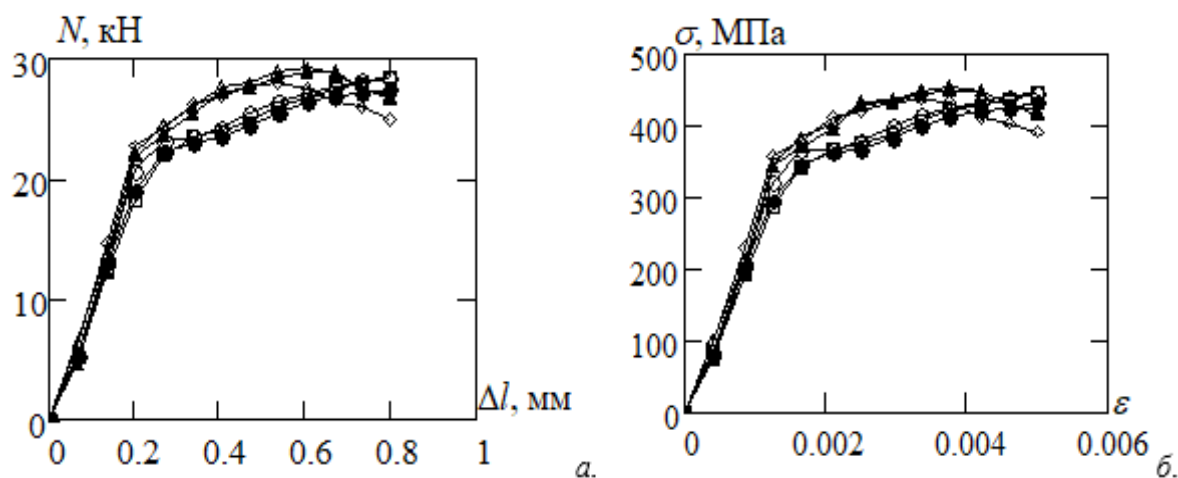


Рис. 8. Залежності прикладеного навантаження від видовження (а) та напруження від відносної деформації (б) (6 кривих) для II типу зразків.

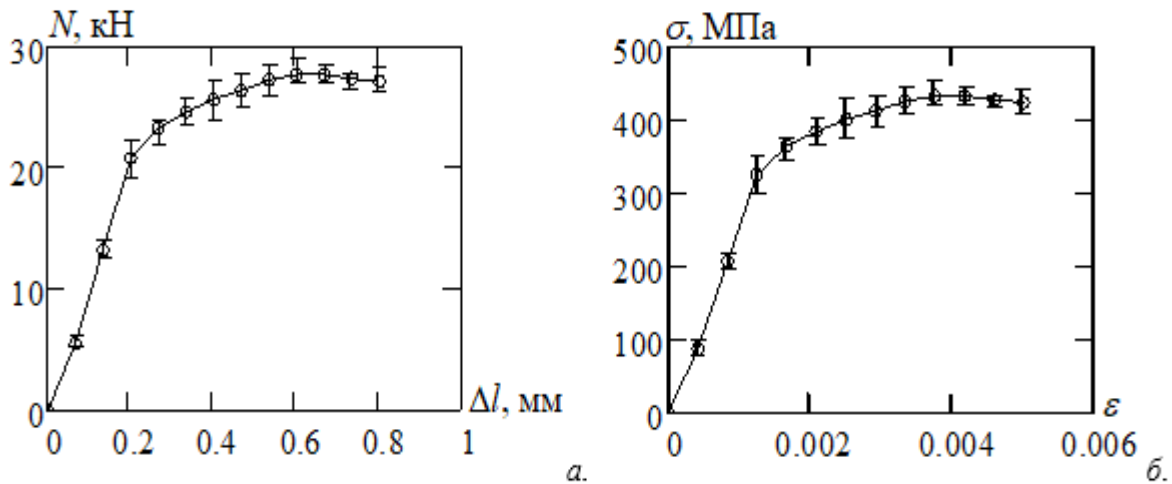


Рис 9. Усереднені залежності прикладеного навантаження від видовження (а) та напруження від відносної деформації (б) з межами відхилень для II типу зразків.

Зварні з'єднання руйнуються через появу тріщин, які можуть виникати в результаті напруги, внутрішніх напружень, недоліків у зварному шва або в процесі охолодження. Тріщини можуть розвиватися з часом під впливом навантажень та середовища. В деяких випадках зварні з'єднання можуть руйнуватися через відшарування, коли шари матеріалу відокремлюються від один одного, що може статися через недостатню адгезію між матеріалами, надмірні температурні або механічні навантаження, або дію агресивних середовищ.

Зварні з'єднання можуть піддаватися деформації внаслідок зовнішніх навантажень, таких як розтяг. У випадку металевих матеріалів, зварні з'єднання руйнуються через корозію, особливо у вологих або агресивних середовищах. Корозія може викликати руйнування шва, особливо якщо вона починається під зварним швом та продовжується вздовж нього.

Перевірка адекватності дозволяє переконатися, що результати випробувань відповідають вимогам відповідних стандартів та регулятивних вимог [9].

Перевірка результатів досліджень включала аналіз на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса.

Для встановлення того, чи є найбільший результат в ранжованому ряді y_{jmax} викидом чи квазівикидом, розрахований критерій Граббса, G_{jmax} за формулою (1)

$$G_{jmax} = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{s_j}, \quad (1)$$

де \bar{y}_j і S_j - відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду, y_{jmin} , розраховуємо критерій Граббса, G_{jmin} за формулою (2):

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{s_j}, \quad (2)$$

Розраховані таким чином значення G_{jmax} та G_{jmin} порівнюємо з 5 % ($G_{кр.5\%}$) та 1 % ($G_{кр.1\%}$) критичними значеннями.

Якщо після порівняння G_{jmax} або G_{jmin} з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ($G_{кр.5\%}$) і менше (або дорівнює) 1 %-го ($G_{кр.1\%}$) критичного значення ($G_{кр.1\%}$), тоді значення y_{jmax} або y_{jmin} вважають квазівикидом.

Якщо розраховане значення G_{jmax} або G_{jmin} більше 1 %-го критичного значення ($G_{кр.1\%}$), то відповідно y_{jmax} або y_{jmin} вважають викидом.

Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} є меншими (або рівними) за критичні значення 5% ($G_{кр.5\%}$), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях для зразків I та II типів викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рис. 10

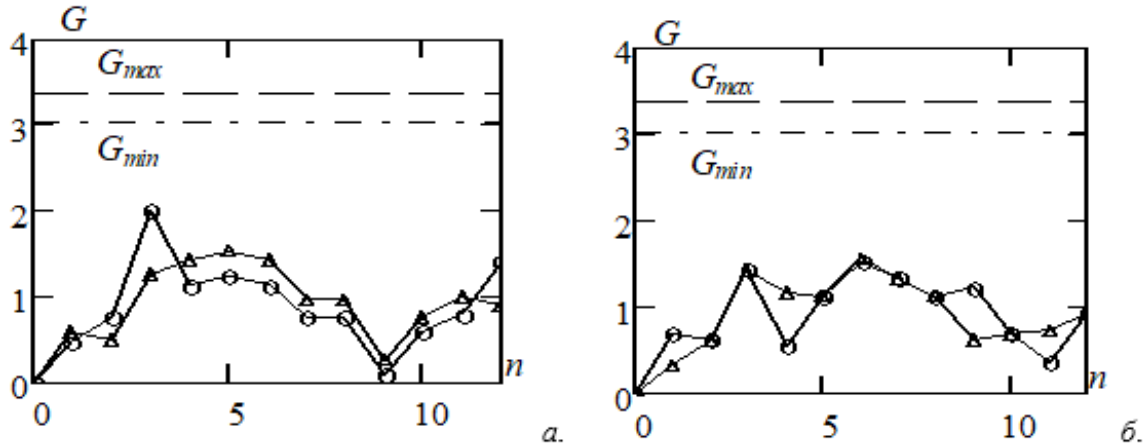


Рис. 10. Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса для зразків I типу (а) та для зразків II типу (б).

Таким чином отримані результати свідчать, що експериментальні дослідження не містять викидів та квазिवикидів. А експериментальні дослідження містять викиди та квазिवикиди, які ми виключаємо та переходимо до подальшого оброблення результатів експериментальних досліджень.

З метою перевірки збіжності експерименту, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися за формулою (3)

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n} \quad (3)$$

де x_i – значення i -го дослідження; \bar{x}_i – середнє значення; n – кількість досліджень.

З метою визначення на скільки в середньому відхиляються значення i -го дослідження від середнього значення всіх досліджень обчислено середнє абсолютне відхилення за формулою (4):

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n} \quad (4)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою (5):

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n \cdot \bar{x}_i} \cdot 100\% \quad (5)$$

Для визначення ступеня розсіювання значень випадкової величини (x_i) відносно її математичного сподівання (\bar{x}_i) та мінливості вибірки обчислено середнє квадратичне

відхилення результатів досліджень за формулою (6):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}} \quad (6)$$

При моделюванні резервуарів велике значення має математичне описання їхньої поведінки в умовах механічного навантаження. Для цього основними даними для побудови моделі матеріалу визначається з узагальненої діаграми деформування. На рис. 11 показаний основний принцип узагальнення експериментальних даних для побудованні діаграми деформування.

Висновки.

1. Таким чином було розроблено методику експериментальних досліджень зварного з'єднання резервуару, як найбільш слабкого елемента, руйнування якого спричиняє відрив корпусу резервуару від днища.

2. В ході експериментальних досліджень були отримані результати випробувань зразків зварних з'єднань та побудовані відповідні криві залежності силових факторів від їхніх деформацій.

3. Проаналізована адекватність отриманих експериментальних даних на основі обчислення статистичних критеріїв у результаті чого встановлено, що експериментальні дані є адекватними, оскільки критерій Фішера та критерій Граббса не перевищують табличного значення, а середня відносна похибка є не більше за 7 %.

4. Було отримано механічні характеристики зразків зварювальних з'єднань: межа текучості у діапазоні 240-300 МПа; модуль пружності 190-240 ГПа; модуль зміцнення 18-20 ГПа та гранична пластична деформація 0.00334. Отримані дані у вигляді,

що поданий у табл. 2 можна використовувати для математичного моделювання поведінки зразків в умовах навантаження.

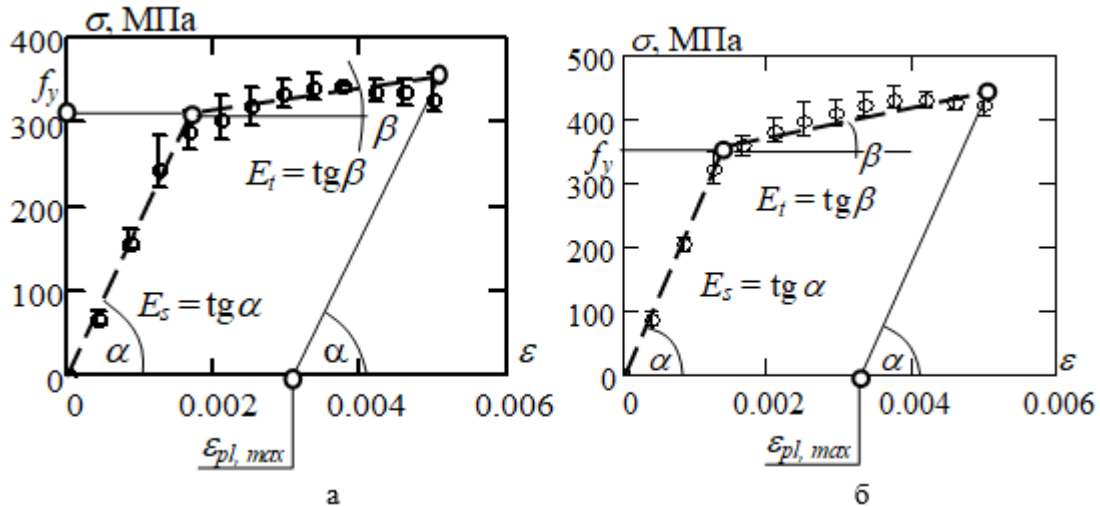


Рис. 11. Схема визначення механічних властивостей для зразків I типу (а) та для зразків II типу (б).

Використовуючи схеми, показані на рис. 11 були визначені відповідні параметри, які встановлюють механічні властивості

зварного шва. У табл. 2 подані визначені характеристики.

Таблиця 2. Механічні характеристики зварювального шва зразків різних типів.

Тип зразків	Межа текучості, f_y , МПа	Модуль пружності, E_s , МПа	Модуль зміцнення, E_s , МПа	Максимальна пластична деформація, $\epsilon_{pl, max}$
I тип	242	$1.932 \cdot 10^5$	$4.893 \cdot 10^4$	0.00334
II тип	300	$2.3 \cdot 10^5$	$4.055 \cdot 10^4$	0.00334

Список літератури.

- ВБН В.2.2-58.1-94* Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. [Чинний від 1994-10-01] Вид. офіц. Київ, 1994. 96 с. Держкомнафтогаз.
- World Fire Statistics 2011-2023 URL: <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>. (дата звернення 05.03.2024)
- Інформаційно-аналітична довідка про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися упродовж 2018-2022 років URL: <https://dsns.gov.ua/uk/operational-information/nadzvicaini-situaciyi-v-ukrayini-2/dovidka-za-rik> (дата звернення 05.03.2024).
- Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами: дис. канд. тех. наук: 21.06.02. ЛДУБЖД, Львів, 2015. 121 с.
- ДСТУ-Н Б А.3.1-31:2015 Настанова з виготовлення і монтажу сталевих вертикальних циліндричних резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів об'ємом від 100 м³ до 50 000 м³. [Чинний від 2016-07-01] Вид. офіц. Київ, 2015. 117 с. Технічний комітет «Спецмонтаж».
- ДСТУ Б В.2.6-183:2011 Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови. [Чинний від 2012-10-01] Вид. офіц. Київ, 2011. 99 с. Укрархбудінформ.
- ДСТУ 2651:2005 Сталь вуглецева звичайної якості. [Чинний від 2006-09-01] Вид. офіц. Київ, 2005. 25 с. УкрНДІМет.
- Ванкевич П.І. Лабораторний практикум з опору матеріалів : навчальний посібник. Львів: Магнолія 2006, 2019. 224 с.
- ДСТУ EN ISO 5178:2015 Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на повздовжнє розтягування металу зварного шва в з'єднаннях, виконаних зварюванням плавленням (EN ISO 5178:2011, IDT; ISO 5178:2001, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДІНЦ, 2015. 112 с.

References

- Designing of oil and petroleum product warehouses with saturated vapor pressure not higher than 93.3 kPa. VBN B.2.2-58.1-94* (1994). (in Ukrainian).

2. World Fire Statistics 2011-2023 (2024). Retrieved from: <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>.
3. Informational and analytical reference on emergency situations in Ukraine that occurred during 2018-2022 (2024). Retrieved from: <https://dsns.gov.ua/uk/operational-information/nadzvicaini-situaciyi-v-ukrayini-2/dovidka-za-rik> (application date 05.03.2024). (in Ukrainian).
4. Chernetsky, V.V. (2015). The effect of fire thermal factors on the integrity of vertical steel tanks with petroleum products: dysn. kand. tehn. nauk 21.06.02. Lviv State University of Life Safety. Lviv. (in Ukrainian).
5. Instructions for the manufacture and installation of steel vertical cylindrical tanks for the storage of oil and petroleum products with a volume from 100 m³ to 50,000 m³. State standard of Ukraine Н Б А.3.1-31:2015. (2015). (in Ukrainian).
6. Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. General technical conditions. State standard of Ukraine Б В.2.6-183:2011. (2011). (in Ukrainian).
7. Carbon steel of ordinary quality. State standard of Ukraine 2651:2005. (2005). (in Ukrainian).
8. Vankevich, P.I. (2006). Laboratory workshop on resistance of materials. Lviv: Magnolia. (in Ukrainian).
9. Destructive testing of welded joints of metallic materials. Longitudinal tensile testing of weld metal in fusion-welded joints. State standard of Ukraine EN ISO 5178:2015. (2015). (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 04.06.2024

Рецензент канд. техн. наук, доц Олександр НУЯНЗІН

Михайло Несух – аспірант кафедри «Міського будівництва і господарства», Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет» (пл. Народна, 3, м. Ужгород, Закарпатська область, Україна, 88000)

E-mail: mikenesukh@gmail.com

Андрій Субота – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри «Міського будівництва і господарства», Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет» (пл. Народна, 3, м. Ужгород, Закарпатська область, Україна, 88000)

E-mail: andriysubota87@gmail.com

Андрій Швиденко – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри «Фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж», Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (Онопрієнко ,8, м. Черкаси, Україна 18034)

E-mail: andwell1980@gmail.com

Олександр Іваненко - канд. пед. наук, старший викладач кафедри «Спеціальної та фізичної підготовки», Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (Онопрієнко ,8, м. Черкаси, Україна 18034)

E-mail: Ivanenko_oleksandr@chipb.org.in

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF WELDED JOINTS IN THE RELEASE OF VERTICAL STEEL TANKS FROM THE BOTTOM DURING A FIRE

Purpose. Development of the methodology of experimental studies of the welded joint of the tank, as the weakest element, the destruction of which causes separation of the tank body from the bottom and research, based on it, of the mechanical characteristics of the welded joints based on the results of the tests.

Methods. Experimental studies included static tensile tests, for which samples with a welded joint made of St3sp steel were used. The samples were made from a steel bar with a cross-section of 8×8 mm and cut into blanks 85 mm long. Welding of St3sp steel blanks was performed using arc welding. The P-10 universal tearing machine was used for tensile testing of structural materials. As a result of the tests, 12 graphs were constructed for each test sample, which were summarised into common graphs by sample type. Verification of research results included analysis for the presence of outliers and quasi-outliers according to the Grubbs criterion.

Results. According to the results of a visual inspection at the end of the experiment, it was found that the samples of types I and II were destroyed at the place of the welded joint. A method of experimental studies of the tank's welded connection was developed, as the weakest element, the destruction of which causes the separation of the tank body from the bottom. The mechanical characteristics of the welded joint samples were obtained: yield strength in the range of 240-300 MPa; modulus of elasticity 190-240 GPa; the hardening modulus is 18-20 GPa and the ultimate plastic deformation is 0.00334. The adequacy of the obtained experimental data was analysed, as a result of which it was established that the experimental data are adequate, and the average relative error is no more than 7%. To compare the obtained experimental data, a generalised deformation diagram was designed. The relevant parameters that determine the mechanical properties of the weld were determined.

Scientific novelty. For the first time, a method of experimental research on the strength of welded joints was developed and applied when the body of a vertical steel tank is separated from the bottom during a fire.

Practical significance. The obtained data can be used for mathematical modelling of the behaviour of welded joints of steel vertical tanks for the storage of petroleum products in the event of a fire.

Keywords. Steel tanks, welded joint, petroleum products, fire, static tensile test.

Mykhailo Nesukh - graduate student of the Department of "Urban Construction and Economy", State Higher Educational Institution "Uzhgorod National University" (3 Narodna Square, Uzhhorod, Zakarpattia Oblast, Ukraine, 88000)

E-mail: mikenesukh@gmail.com

Andrii Subota - PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Economy, State Higher Educational Institution "Uzhgorod National University" (3 Narodna Square, Uzhhorod, Zakarpattia Oblast, Ukraine, 88000)

E-mail: andriysubota87@gmail.com

Andrii Shvydenko - PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physical and Chemical Foundations of Fire Development and Extinguishing, Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the Ukrainian National Center for Fire Safety (Onoprienko, 8, Cherkasy, Ukraine 18034)

E-mail: andwell1980@gmail.com

Oleksandr Ivanenko - candidate ped. of Sciences, senior lecturer of the Department of Special and Physical Training, Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National Center of Ukraine (Onoprienko, 8, Cherkasy, Ukraine 18034)

E-mail: Ivanenko_oleksandr@chipb.org.in