УДК 614.841.45 **DOI: 10.33042/2522-1809-2024-4-185-186-196**

М.М. Несух[1], А.В. Субота[1], А.В. Швиденко[2], О.В. Некора[2]

[1]Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет», Україна
[2]Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ В УМОВАХ ВІДРИВУ КОРПУСУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ВІД ДНИЩА ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

Викладено результати експериментальних та теоретичних досліджень процесів руйнування зварних з'єднань в умовах відриву корпусу вертикальних сталевих резервуарів від днища під час пожежі. Отримано міцнісні характеристики зразків зварювальних з'єднань шляхом механічних випробувань. Побудовано модель поведінки зварних з'єднань сталевих резервуарів для нафтопродуктів під час відриву корпусу від днища в умовах пожежі.

Ключові слова: *випробування на статичний розтяг, зварне з'єднання, нафтопродукти, пожежа, сталеві резервуари.*

Постановка проблеми

Одним із основних небезпечних факторів при пожежах в резервуарних парках для зберігання нафтопродуктів є відрив корпусу вертикальних сталевих резервуарів від днища внаслідок руйнування зварних з'єднань.

Проблема, яка розглядається в цій статті, полягає у визначенні причин та умов, що призводять до відриву корпусу вертикальних сталевих резервуарів від днища під час пожеж, спричинених вибухами. Незважаючи на те, що зварні шви між корпусом і днищем повинні бути достатньо міцними для забезпечення цілісності резервуара, на практиці часто спостерігається порушення цього балансу. Внаслідок помилок на етапах проєктування, виготовлення чи експлуатації слабкий шов між дахом і корпусом може виявитися міцнішим за шов між корпусом і днищем, що призводить до небажаних відривів корпусу під час вибухів. Це становить значну небезпеку, оскільки відрив корпусу може спричинити пошкодження сусідніх об'єктів і створити додаткові ризики поширення пожежі.

Тому існує необхідність у розробці та верифікації методики оцінювання міцності зварних з'єднань вертикальних сталевих резервуарів, що зазнають дії екстремальних теплових і механічних навантажень під час пожеж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У цьому дослідженні основна увага зосереджена на наземних сталевих резервуарах зі стаціонарними дахами, на яких стається значна кількість пожеж [1, 2].

У статтях [3–7] висвітлюють ключові аспекти дослідження пожеж у резервуарах з нафтопродуктами в Україні, пропонуючи як аналіз ризиків, так і практичні рекомендації щодо підвищення безпеки на таких об'єктах.

Автори в роботах [3, 4] досліджують специфіку горіння нафтопродуктів у резервуарах та пропонують заходи для підвищення протипожежного захисту таких об'єктів.

Дослідження [5] присвячене оцінці ризиків виникнення пожеж у резервуарних парках, які зберігають нафтопродукти, з урахуванням різних факторів, що впливають на безпеку об'єктів.

Різні методи забезпечення безпеки під час пожеж на резервуарах з нафтопродуктами, включно із рекомендаціями щодо вибору протипожежного обладнання та засобів гасіння пожеж, описуються у матеріалах досліджень [6, 7].

Основна ідея роботи [8] полягає у виявленні особливостей впливу нестаціонарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії на них теплових факторів пожеж.

Загальна статистика руйнувань резервуарів вертикального сталевого типу (РВС) показує, що 46,4 % випадків призвели до значних пожеж з постраждалими. З них 6,4 % руйнувань були спричинені безпосередньо впливом високих температур та тиску. Механізм руйнування РВС є складним і досі недостатньо вивченим. За даними експертних досліджень, основною причиною руйнування РВС є пошкодження найбільш навантаженого конструктивного елемента – вузла з'єднання стінки резервуара з його днищем [9–12].

 © Несух М.М., Субота А.В., Швиденко А.В., Некора О.В.

У разі вибуху резервуарів часто спостерігається відрив корпусу від днища з подальшим його переміщенням на значну відстань. З досвіду перебігу аварій такого типу відомо, що під час вибуху РВС-5000 корпус був відкинутий приблизно на 50 метрів, вибух РВС-700 призвів до переміщення корпусу на 25 метрів, а вибух РВС-3000 спричинив перекидання корпусу без подальшого польоту [1, 8]. Такі випадки свідчать про порушення співвідношення міцності між слабким швом між дахом і корпусом та сильним швом між корпусом і днищем. Через помилки на стадіях проєктування, виготовлення або експлуатації слабкий шов може виявитися міцнішим, що призводить до переміщення корпусу разом з дахом, а не його відриву.

У наукових дослідженнях [8–12] проаналізовано низку вибухів та пожеж, у результаті чого було визначено найбільш імовірний напрямок польоту резервуара – у бік обв'язки приймально-роздавальними пристроями. Також встановлено, що польоти резервуарів відбуваються тоді, коли рівень рідини в них не перевищує половини висоти резервуара. На підставі цих даних було зроблено висновок про необхідність врахування характеру вибуху та траєкторії польоту резервуара при оцінці ситуації та організації гасіння пожежі в резервуарному парку. Однак цей напрямок захисту є малоефективним, оскільки неможливо збільшити відстань між резервуарами або передбачити безпечне місце для приземлення резервуара після польоту. Тому конструкція резервуара повинна запобігати його відриву та польоту.

За наявності жорсткої основи можливо, що руйнування та підскік резервуара відбуваються внаслідок появи відбитої хвилі, яка з подвоєною силою підштовхує резервуар нагору, одночасно притискаючи днище до основи. Однак і в цьому разі найкращим варіантом захисту від вибуху є слабкий шов на даху та додаткове анкерування корпусу резервуара.

Для запобігання відриву корпусу від днища необхідно, щоб у момент руйнування слабкого шва на даху шов біля днища залишався міцним із запасом надійності. Для визначення безпечного співвідношення міцностей розглянемо сили, що діють на обидва зварні шви в момент вибуху.

Аналіз закордонних публікацій [9, 10], присвячених дослідженню міцності зварних з'єднань вертикальних сталевих резервуарів під впливом екстремальних навантажень, вказує на значну увагу до проблеми надійності резервуарних конструкцій у випадках аварійних ситуацій, а саме пожеж. Зокрема, в роботі [9] розглядається вплив пожеж на міцність сталевих резервуарів, з використанням як експериментальних, так і чисельних методів для оцінки опору різних зварних з'єднань. У наступному дослідженні за цим напрямом [10] аналізується термічна поведінка сталевих резервуарів під впливом пожежі, особливо зварних з'єднань, а також їхня здатність витримувати високу температуру та навантаження.

Робота [11] фокусується на чисельному моделюванні термічної та структурної поведінки зварних з'єднань у великих нафтових резервуарах при пожежі, з метою покращення прогнозування їхньої міцності.

Питанням впливу вибухових навантажень на зварні з'єднання великих резервуарів, з акцентом уваги на їхній міцності та можливих механізмах руйнування, присвячено дослідження [12].

Мета статті

Мета дослідження полягає у розробці та реалізації методики моделювання поведінки зварних з'єднань, як найбільш слабкого елемента, руйнування якого спричиняє відрив корпусу резервуара від днища під час пожежі, на основі проведених механічних випробувань металевих зразків.

Для досягнення мети поставлені такі завдання:

– розробити математичну модель, яка описує поведінку зварного з'єднання під впливом механічних навантажень, враховуючи матеріальні властивості зразка, геометрію зварного шва, а також тип і характер механічного навантаження;

– обробити та проаналізувати результати механічних випробувань зварних з'єднань з метою отримання емпіричних даних для верифікації та калібрування математичної моделі;

– провести чисельні розрахунки за допомогою розробленої математичної моделі та порівняти результати з експериментальними даними;

– провести аналіз отриманих результатів з метою оцінки адекватності математичної моделі. У разі виявлення невідповідностей скоригувати модель і повторити розрахунки для досягнення максимальної відповідності між чисельними та експериментальними даними.

Виклад основного матеріалу

Об'єкт та гіпотеза дослідження.

Об'єктом дослідження є метод ідентифікації міцності зварних з'єднань сталевих резервуарів за результатами механічних випробувань металевих зразків.

Цей метод досліджувався з погляду адекватності отриманих результатів, для того щоб обґрунтувати його використання як інструмента дослідження міцності зварних з'єднань з метою виявлення закономірностей процесу відриву корпусу сталевого резервуара для зберігання нафтопродуктів від днища під час пожежі.

Для реалізації методу було зроблено комплекс гіпотез та припущень. Припускається, що розроблена математична модель, яка враховує геометричні, фізико-механічні властивості матеріалів і умови навантаження, зможе адекватно відтворювати поведінку зварного з'єднання під час механічних випробувань.

Вважається, що неоднорідності в зварному шві (наприклад, залишкові напруги, мікроструктурні відмінності між зварним швом та основним металом)

є критичними факторами, що впливають на поведінку з'єднання під час механічних навантажень, і повинні бути включені в математичну модель.

Припускається, що для певних діапазонів навантаження поведінка матеріалу зварного з'єднання може бути описана як лінійна, але при високих навантаженнях буде спостерігатися нелінійна деформація, яка повинна бути врахована в моделі. Різні типи навантаження (розтягнення, згинання, стиснення) мають суттєво різний вплив на поведінку зварного з'єднання, і ці відмінності повинні бути відображені в математичній моделі.

Матеріал зварного з'єднання вважається ізотропним, тобто його фізико-механічні властивості є однаковими в усіх напрямках, якщо не враховувати локальні особливості в зоні зварного шва. Вважається, що зварні шви не мають серйозних дефектів, зокрема тріщин або пор, які могли б суттєво змінити результати механічних випробувань. Це дозволяє спростити модель на етапі її розробки.

Припускається, що навантаження на зварне з'єднання під час випробувань відбувається в квазістатичних умовах, тобто швидкість навантаження є достатньо низькою, щоб динамічні ефекти не впливали на результати.

Ідея роботи полягає у порівнянні даних, які отримані під час механічних випробувань та числового експерименту, для встановлення адекватності результатів, отриманих запропонованим методом.

Методика проведення дослідження поведінки зварних з'єднань резервуара.

При проведенні досліджень виконуються такі основні етапи. Під час першого етапу проводяться механічні випробування зварних з'єднань з метою отримання емпіричних даних для верифікації та калібрування математичної моделі.

Другим етапом досліджень передбачаються чисельні розрахунки за допомогою розробленої математичної моделі з використанням інженерно-теоретичного підходу, що має у свої основі явний метод інтегрування рівнянь механіки взаємодії твердих тіл, що деформуються.

Третій етап охоплює моделювання зварних з'єднань та сталі зразків із використанням моделі пружно-пластичного матеріалу, що описується білінійними діаграмами деформування типу Прандтля, форма яких включає ділянку пружності та похилу ділянку зміцнення із граничною деформацією.

Останній етап передбачає аналіз отриманих результатів для оцінки адекватності математичної моделі.

Методика визначення початкових даних для проведення ідентифікації міцнісних властивостей зварних з'єднань резервуара.

Набір початкових даних, необхідних для проведення математичного моделювання, визначається за допомогою механічних випробувань досліджуваних металевих зразків. Методика та реалізація таких випробувань детально описана в роботі [13] відповідно до ДСТУ EN ISO 5178:2015.

Методика механічних випробувань зразка зварного з'єднання включає кілька основних підетапів, кожний з яких є важливим для отримання необхідних результатів.

1. Підготовка зразків. Визначення типу матеріалу, який буде використовуватись для зразків.

Зразки були виготовлені зі сталевого прутка марки Ст3сп, з поперечним перерізом 8×8 мм, шляхом розрізання на заготовки довжиною 85 мм (рис. 1).

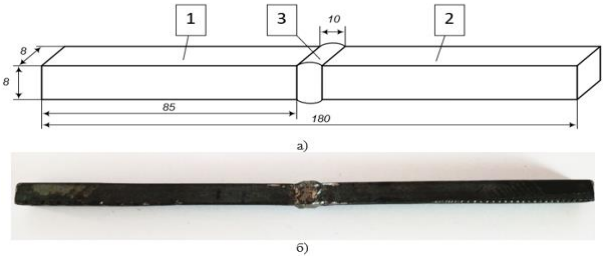

Рис. 1. Експериментальний зразок: а) схематичний вигляд експериментального зразка (1, 2 – заготовки зі стального прутка; 3 – зварний шов); б) загальний вигляд зразка

2. Проведення випробувань. Налаштування випробувального обладнання. Підготовка випробувальної машини. Випробування проводилось на універсальній розривній машині Р-10 (рис. 2).

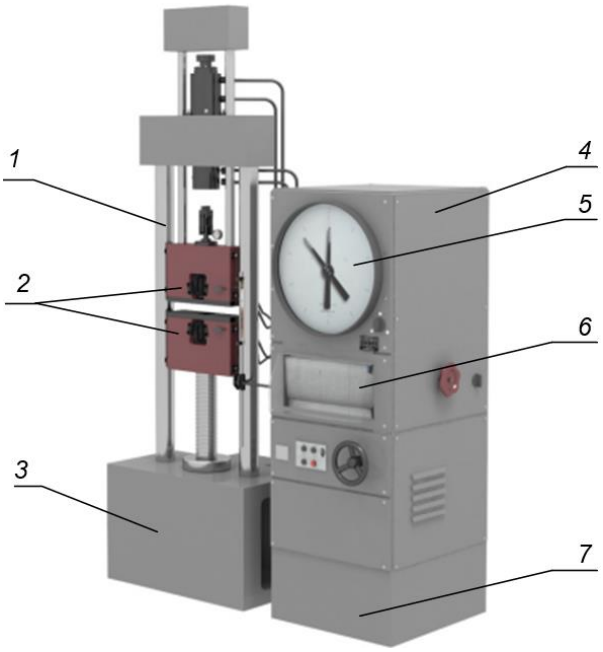

Рис. 2. Універсальна випробувальна розривна машина Р-10: 1 – колони; 2 – захоплювачі; 3 – силова частина, нижня рухома траверса; 4 – пульт керування; 5 – силовимірювач; 6 – механізм самописця; 7 – насосна установка

Розміщення зразка у випробувальній машині відбувалося відповідно до стандарту ДСТУ EN ISO 5178:2015, щоб забезпечити рівномірний розподіл навантаження на зразок.

3. Вимірювання та реєстрація даних. Застосування навантаження до зразка до його руйнування або до досягнення встановленого порога деформації. Під час випробування вівся автоматичний та ручний запис даних випробування, серед яких сила навантаження, переміщення, деформація, для подальшого аналізу. Будувались діаграми «сила–деформація», графіки, таблиці з числовими даними.

4. Аналіз результатів. Аналіз отриманих даних для визначення основних характеристик зварного з'єднання: межі міцності та текучості, модуля пружності.

Порівняння з теоретичними та нормативними даними. Порівняння результатів випробувань з теоретичними прогнозами та нормативними вимогами.

Виявлення можливих відхилень від стандартних результатів. Аналіз можливих відхилень в отриманих результатах, що можуть вказувати на дефекти зварного з'єднання або помилки в методиці проведення випробувань.

Під час проведення випробування були отримані та проаналізовані усі необхідні міцнісні характеристики досліджуваних зразків двох типів.

За результатами візуального огляду встановлено, що зразки I та II типів руйнувалися в області зварного з'єднання. Відмінність між результатами для зразків I та II типів полягала в різному прикладеному навантаженні та тривалості випробувань.

Під час випробувань використовувався спеціальний пристрій, який фіксував довжину зразка перед початком навантаження і під час його подовження. Потім для кожного значення прикладеної сили вимірювалась різниця між початковою та кінцевою довжиною зразка. Видовження фіксувалося як абсолютна величина відносно початкової довжини зразка.

У результаті випробувань було побудовано 12 графіків [13] для кожного випробувального зразка, які потім були узагальнені у спільні графіки для кожного типу зразків. На основі цих графіків були визначені відповідні параметри, які встановлюють механічні властивості зварного шва (табл. 1).

Таблиця 1

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, $\varepsilon_{pl,max}$
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

Моделювання поведінки зварних з'єднань резервуара.

Для перевірки математичних моделей, що використовуються для вивчення поведінки металевих конструкцій зі зварними з'єднаннями, була поставлена мета створити такі моделі та провести числовий експеримент з їх використанням. Основні положення цього дослідження викладені нижче.

1. Математичний опис напружено-деформованого стану (НДС) у зразках зварних з'єднань здійснюється на основі інженерно-теоретичного підходу, який базується на явному методі інтегрування рівнянь механіки взаємодії твердих деформівних тіл.

2. Загальний інженерно-теоретичний підхід полягає у визначенні переміщень точок конструкційної системи, яка складається з твердих деформованих тіл, шляхом числового інтегрування системи загальних рівнянь динаміки методом кінцевих різниць (МКР) та рівнянь НДС, що описують взаємодію твердих тіл у системі, методом скінченних елементів (МКС).

3. Для моделювання зразків зварних з'єднань з метою зниження розмірності задачі та з урахуванням прийнятих гіпотез для моделювання резервуарів використовуються плоскі чотиривузлові скінченні елементи типу оболонок Беличка–Цая [14] з п'ятьма точками інтегрування по товщині.

4. Для моделювання зварних з'єднань та сталі зразків застосовується модель пружно-пластичного матеріалу із законом деформування, що описується білінійними діаграмами деформування типу Прандтля [15]. Ці діаграми включають пружну ділянку та похилу ділянку зміцнення з граничною деформацією, параметри якої відповідають даним, наведеним у табл. 1.

5. Для опису силової взаємодії в межах зварних з'єднань зразків використовується завдання поступального руху одного з кінців зразка при закріпленому іншому кінці, як це відбувається при випробуваннях на розривній машині. Переміщення має динамічну історію і здійснюється протягом визначеного часу, який приблизно відповідає умовам проведення експерименту.

Для моделювання процесу поведінки зразків зі зварними з'єднаннями під час механічних випробувань застосовується CAE-комплекс LS-DYNA (розроблений Ліверморською національною лабораторією імені Е. Лоуренса в США). CAE-комплекс LS-DYNA є окремим модулем інженерної розрахункової системи Ansys Workbench і може бути інтегрований в програмно-розрахунковий комплекс Ansys APDL. Графічно-дизайнерський процесор цієї системи є безкоштовним програмним додатком, а ліцензія на

проведення розрахунків для підготовлених з його допомогою моделей надається у межах комп'ютерної системи Ansys Workbench або в окремому модулі Ansys APDL, що запускається через Ansys Launcher. CAE-комплекс LS-DYNA призначений для моделювання динамічної взаємодії в конструктивних системах і розрахунку результатів цієї взаємодії із застосуванням явного алгоритму інтегрування рівнянь механіки з використанням методу скінченних елементів для відтворення НДС, контролю контактної взаємодії та розрахунку силового відгуку на неї за допомогою методу штрафних функцій. Він також забезпечує динамічну зміну геометрії сітки скінченних елементів при її перебудові та фрагментації на окремі частини, які можуть включатися до подальшого контакту.

Основним інженерно-теоретичним підходом до математичного моделювання є визначення деформації елементів зразків зварних з'єднань на основі загальних диференціальних рівнянь, які описують деформовані тіла як складові частини динамічної системи. В таких умовах окреме тверде деформоване тіло, як компонент динамічної системи, на початку руху (при початковому часі $t = 0$) зображене на рис. 3. У цьому стані тверде деформоване тіло має початкову геометричну конфігурацію з об'ємом Ω_0, який обмежується поверхнею Γ_0. У певний момент часу t об'єм цього ж тіла може змінитися та позначається як Ω, з граничною поверхнею Γ, що його обмежує. Під час руху тіла з початкового стану Ω_0 до стану Ω довільна точка з координатами X, що належить досліджуваному тілу з початковим об'ємом Ω_0, зашатиметься частиною цього ж тіла при зміні його об'єму до Ω у кінцевому положенні з координатами x.

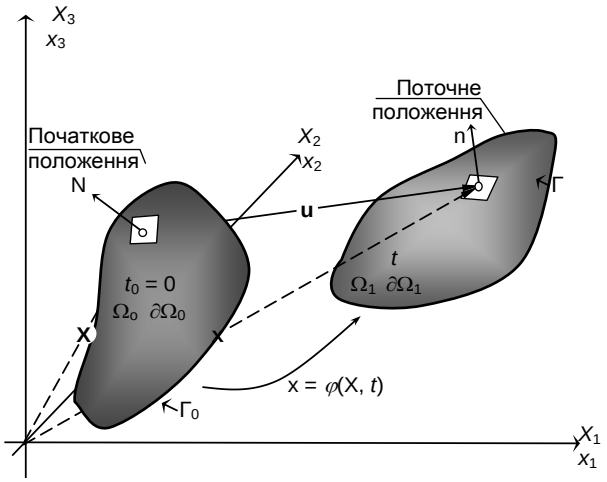

Рис. 3. Початковий стан твердого тіла без деформації та його поточний стан під час механічного руху з урахуванням деформації

Основні диференціальні рівняння, що описують поточний стан твердого тіла як частини динамічної системи, записуються через математичні вирази, які є формулюваннями законів динаміки механічних систем і консервативних законів динаміки, відповідно до праць T. Belytschko, D. P. Flanagan та ін. [16]. Використання принципу можливих переміщень δ_{xi} для опису руху твердих деформованих тіл у випадку контактної взаємодії дозволяє сформулювати рівняння збереження енергії через віртуальні роботи:

$$\int_{\Omega}\left[\rho\,\ddot{x}_i+\sigma_{ij,j}-\rho\,f_i\right]\delta x_i d\Omega+\int_{\Gamma_f}\left[\sigma_{ij}n_j-t_i\right]\delta x_i d\Gamma+\int_{\Gamma_c}\left(\sigma_{ij}^{+}-\sigma_{ij}^{-}\right)n_j\delta x_i d\Gamma=0, \tag{1}$$

де $\sigma_{ij,j}$ – тензор Коші, що визначає величини напружень у заданій точці деформованого твердого тіла;

ρ – густина матеріалу у певній точці деформованого твердого тіла;

$\rho\cdot f_i$ – зовнішні сили, що діють у визначених точках досліджуваного деформованого твердого тіла;

$\ddot{x}_i$ – прискорення певної точки досліджуваного твердого деформованого тіла у поточний момент часу.

Оскільки загальна сума можливих робіт повинна дорівнювати нулю, після відповідних перетворень рівняння (1) можна виразити у наступній формі:

$$\sum_{e=1}^{en}\left[\int_{\Omega_e}\rho\,\mathbf{N}^{\mathrm{T}}\mathbf{N}\,\mathbf{a}_e d\Omega+\int_{\Omega_e}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\,d\Omega-\int_{\Omega_e}\rho\,\mathbf{N}^{\mathrm{T}}\mathbf{b}\,d\Omega-\int_{\Gamma_e}\mathbf{N}^{\mathrm{T}}\mathbf{t}\,d\Gamma\right]=0, \tag{2}$$

де N – інтерполяційна матриця параметричних функцій форми КЕ;

σ – вектор напружень;

B – матриця жорсткості;

a_e – вектор вузлових прискорень;

b – вектор навантажень;

t – вектор тягових сил.

Для розрахунків конструкційної системи, яка являє собою зразок зварного з'єднання, використовуються скінченні елементи типу оболонки Беличка–Цая [14]. Цей тип скінченних елементів передбачає математичне описання взаємодії шляхом комбінації обертальних і поступальних переміщень точок під час їх деформації. Вибір такого типу скінченних елементів

обґрунтований припущеннями щодо кінематики руху тіла при використанні локальної системи координат.

Швидкість деформації визначається за допомогою тензора напружень Коші, що дозволяє уникнути збільшення обсягу розрахунків при врахуванні фізичної нелінійності законів деформування.

Для введення базових кінематичних і силових співвідношень у скінченному елементі типу оболонки Беличка–Цая встановлюється локальна система координат, орти якої будуються відповідно до схеми на рис. 4 [14].

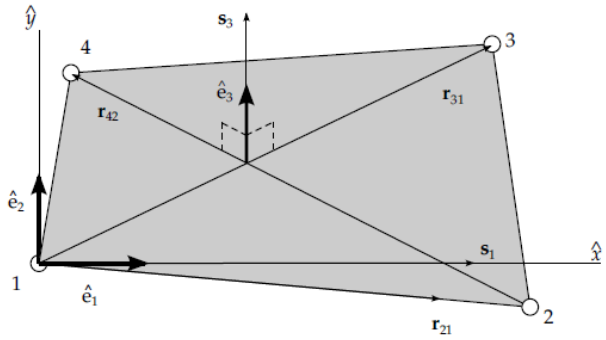

Рис. 4. Схема визначення геометрії скінченного елемента [14]

Для встановлення базових співвідношень для скінченних елементів типу оболонки Беличка–Цая застосовується гіпотеза Міндліна [17]. Згідно із цією гіпотезою, швидкість довільної точки, яка належить до скінченного елемента цього типу, може бути обчислена за формулою:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}^m - \hat{z}\mathbf{e}_3 \times \boldsymbol{\theta}, \qquad (3)$$

де v^m – вектор швидкості середини скінченного елемента;

θ – кутова швидкість;

$\hat{z}$ – координата точки за встановленою віссю локальної системи координат.

Згідно з термінологією, прийнятою в документації програмного комплексу LS-DYNA, математичний опис поведінки арматурної сталі відповідає моделі матеріалу з позначенням PLASTIC KINEMATIC Material type No 003. Ця модель описує простий ізотропний матеріал із симетричною діаграмою деформації як для розтягу, так і для стиску.

Деструкція матеріалу в цій моделі відбувається при досягненні граничної деформації, визначеної користувачем. Під час розрахунків моделі з цим матеріалом також може враховуватися швидкість деформації. Для цього застосовується модель Купера–Сімондса [18], яка масштабує величину пластичної деформації залежно від швидкості деформації за допомогою постійних параметрів, що встановлюються користувачем.

На рис. 5 наведена конструктивна схема зразка зварного з'єднання для випробувань.

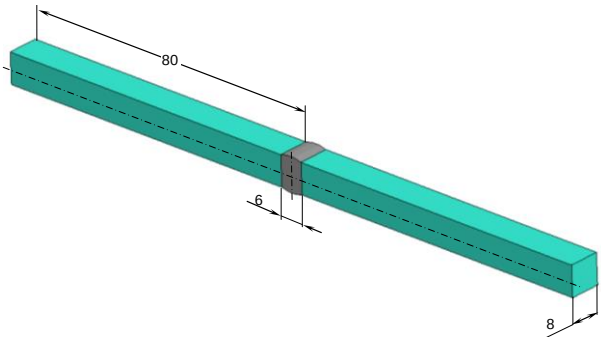

Рис. 5. Конструктивна схема зразка зварного з'єднання для випробувань

Як зазначено вище, зразок для випробування складається з двох стержнів, які імітують стінки резервуара, з'єднаних між собою зварним з'єднанням. При моделюванні цієї конструкції було припущено, що стержні та зварне з'єднання виконані з матеріалу, який враховує як геометричну, так і фізичну нелінійність, а також можливість виникнення великих деформацій, пластичних деформацій і руйнування скінченних елементів при досягненні граничних величин деформацій. Закон деформування матеріалу описується відповідною діаграмою, подібною до тих, що наведені у результатах експериментальних досліджень [13]. Основні параметри матеріалів зразка представлені в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 2

Механічні характеристики сталі стержнів зразка

Клас міцності	Коефіцієнт Пуассона	Модуль пружності, ГПа	Межа текучості, МПа	Густина, кг/м^3	Гранична деформація	Швидкість деформації
С 355	0,3	210	355	7850	0,15	Модель Купера–Сімондса

З урахуванням основних положень та припущень дослідження була розроблена розрахункова схема, що враховує використовувані матеріали з номенклатури програмного середовища LS-DYNA. У цій схемі також відображені прикладені механічні навантаження та обмеження. Розрахункова схема зображена на рис. 6.

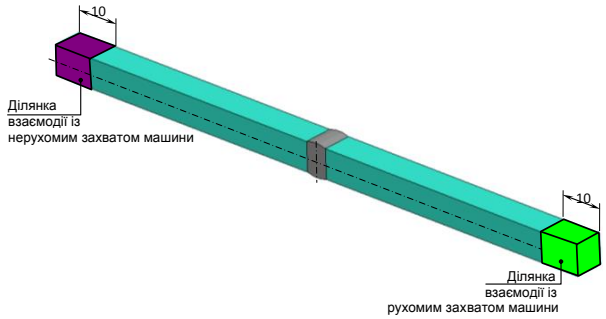

Рис. 6. Розрахункова схема конструктивної системи зразка зварного з'єднання для випробувань

З огляду на викладені вище положення щодо розрахунку та розрахункової схеми на рис. 6. було побудовано скінченно-елементну схему конструктивної системи зразка зварного з'єднання для випробування, що наведена на рис. 7.

На скінченно-елементній схемі, представленій на рис. 7, також показані прикладені граничні умови.

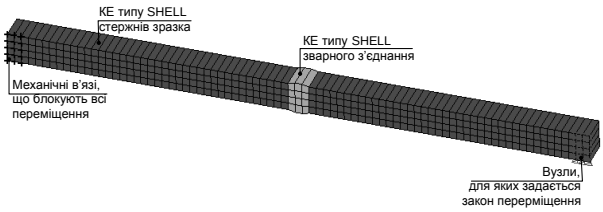

Рис. 7. Скінченно-елементна схема конструктивної системи зразка зварного з'єднання для випробування

Як видно з цієї схеми, для всіх частин математичної моделі конструктивної системи зразка зварного з'єднання була побудована сітка з плоских скінченних елементів типу SHELL. Основні кількісні дані сіткової моделі досліджуваної конструктивної системи зразка зварного з'єднання для випробування наведені в табл. 3. Розміри скінченних елементів були прийняті з огляду на міркування забезпечення співвідношення точності та продуктивності процедури розрахунку.

Таблиця 3

Параметри скінченно-елементної моделі зразка зварного з'єднання для випробування

Частина моделі	Мінімальний розмір, мм	Максимальний розмір, мм	Кількість
Стержні	4	4	320
Зварний шов	4	4,4	12
Всього			332

Результати ідентифікації міцнісних характеристик зварних з'єднань та їх адекватність.

Розрахунок проводився в межах усіх прикладених переміщень до моменту фрагментації зразка, що ілюстровано на рис. 8. Після фрагментації, яка відзначає руйнування скінченних елементів зварного з'єднання, продовжувати розрахунки стає недоцільним.

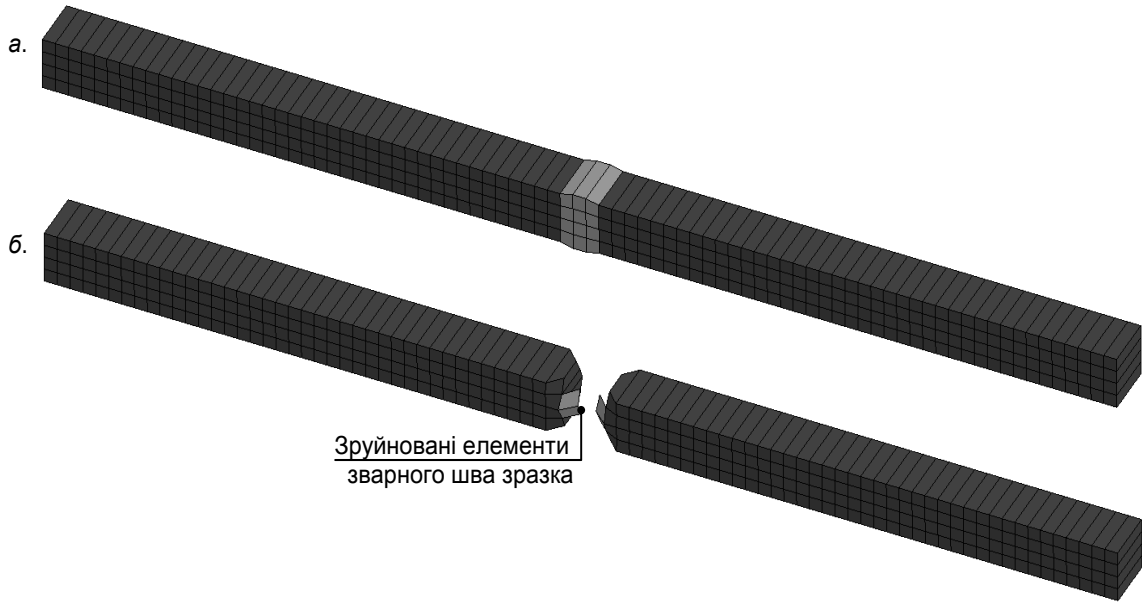

Рис. 8. Скінченно-елементні схеми конструктивної системи зразка зварного з'єднання для випробування: а) – до прикладення навантаження; б) – після прикладення руйнівного навантаження

Як показано на рис. 8, руйнування зразка сталося вздовж зварного шва, оскільки міцність цього шва виявилася нижчою за міцність основного матеріалу стержнів, що були зварені разом. Це узгоджується з практичними результатами експерименту, представленими у дослідженні [13].

На рис. 9 зображена картина головних, найбільших напружень у момент руйнування зварного шва.

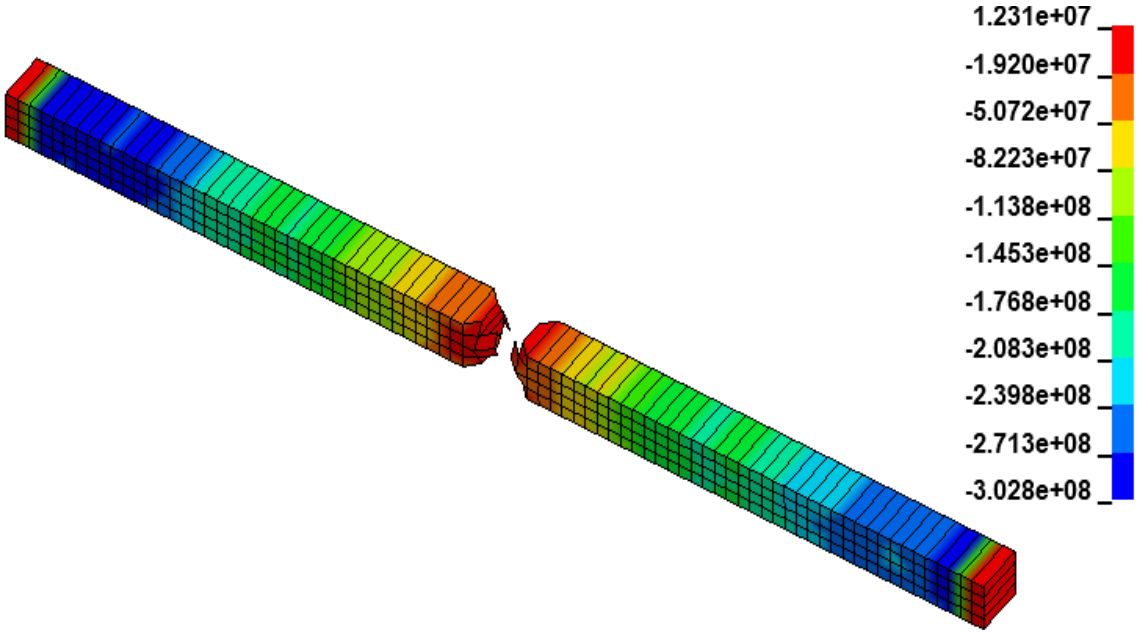

Рис. 9. Розподіл поздовжнього напруження у зразках зварного з'єднання для випробування

У результаті проведених розрахунків було отримано криві залежності найбільших нормальних напружень від відносного переміщення. Отримані залежності наведені на рис. 10.

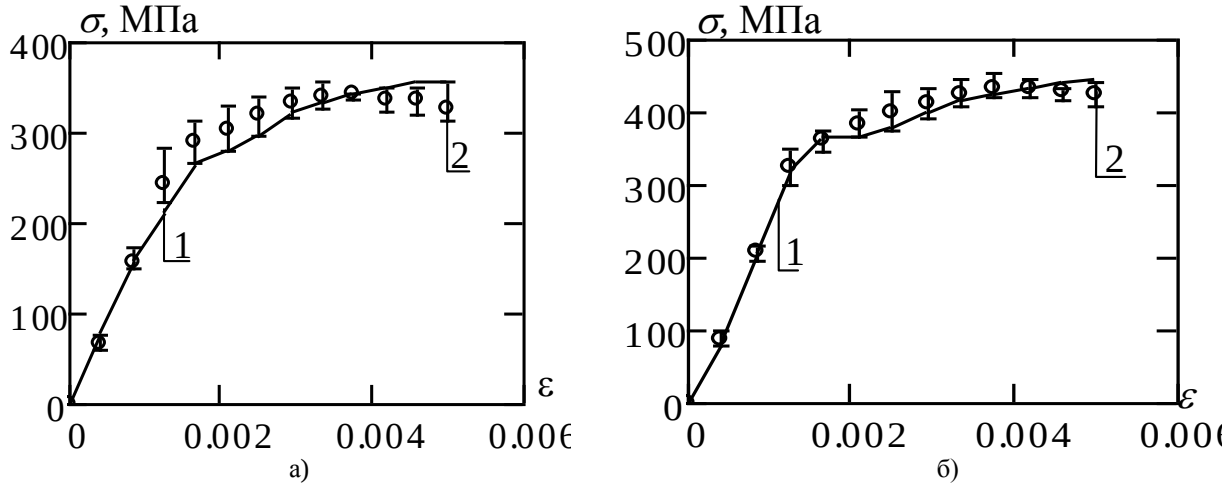

Рис. 10. Усереднені залежності прикладеного навантаження від видовження (а) та напруження від відносної деформації (б) з межами відхилень для II типу зразків: 1 – отримані у результаті моделювання; 2 – отримані у результаті експерименту

Отримані криві показують високу збіжність розрахункових даних із даними експерименту, що підтверджує ефективність прийнятих математичних моделей для розрахунку резервуара із паливом в умовах його відриву від днища.

Для більш детального аналізу було проаналізовано адекватність отриманих розрахункових даних на основі статистичних критеріїв. У табл. 4 показані отримані дані щодо проведеного аналізу.

Аналіз даних табл. 4 показує, що розрахункові дані є адекватними, а застосовані математичні моделі можуть бути використані для моделювання процесів, що відбуваються у резервуарі під час відриву днища в умовах пожежі.

Таблиця 4

Статистичні критерії аналізу адекватності результатів розрахунку

Число ступенів вільності чисельника, v_1	Число ступенів вільності знаменника, v_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності	Дисперсія адекватності	Розрахункове значення F-критерію	Табличне значення F-критерію	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, МПа
Зразки I типу									
12	12	2	12	120,9	2,1	0,64	1,61	10,6	6,3
Зразки II типу									
12	12	2	12	130,3	2,7	0,91	1,74	11,9	4,1

Висновки

У цьому дослідженні було проведено детальний аналіз зварних з'єднань шляхом використання сучасних методів математичного моделювання та експериментальних досліджень. Основною метою було розробити та перевірити методику математичного моделювання поведінки зварних з'єднань під механічними навантаженнями, а також оцінити ефективність запропонованих підходів у прогнозуванні їхньої міцності. З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

1. Були отримано результати випробувань зразка зварного з'єднання та проаналізовано відповідні криві залежності силових факторів від їхніх деформацій.

2. Дослідження показало, що руйнування зварних з'єднань відбувається переважно по зварному шву, де міцність є нижчою, як порівняти з основним матеріалом стержнів. Це узгоджується з практичними даними експерименту, які підтверджують, що зварний шов є слабшою ланкою в конструкції.

3. Обґрунтовано комплекс положень та припущень для здійснення математичного моделювання поведінки зразків зварних з'єднань, що імітують зварні з'єднання у резервуарі для нафтопродуктів, в умовах механічних випробувань на розтяг.

4. На основі результатів проведених випробувань обґрунтовано математичні моделі матеріалу сталі зварних з'єднань резервуарів для нафтопродуктів, а також отримано числові параметри механічних властивостей сталі зварних 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.

5. На основі комплексу обґрунтованих математичних моделей зварних з'єднань проведено розрахунки щодо числового дослідження поведінки зварних з'єднань в умовах їхніх механічних випробувань.

6. Отримані результати було порівняно із результатами експериментальних випробувань і на основі цього порівняльного аналізу встановлено, що вони є адекватні, оскільки критерій Фішера не перевищує табличного значення, а відносна похибка не перевищує 12 %.

Література

1. World Fire Statistics 2011-2023 URL: https://www.ctif.org/world-fire-statistics. (дата звернення 05.03.2024).

2. 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).

3. Коваленко М. М., Сивак В. В. (2016) - "Особливості горіння нафтопродуктів у резервуарах і заходи протипожежного захисту" Пожежна безпека, 1, 12-18.

4. Грищенко В. В., Кобзев І. С. (2015) - "Аналіз пожежної безпеки об'єктів зберігання нафтопродуктів." Збірник наукових праць Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту, 2(30), 35-41.

5. Омельченко І. І., Рудик К. М., Матяш В. Г. (2017) - "Оцінка ризиків виникнення пожеж на резервуарних парках." Вісник Національного університету цивільного захисту України, 26, 91-97.

6. Горбатюк М. В., Гладкий Р. В., Лещенко І. І. (2018) - "Методи забезпечення безпеки при пожежах на резервуарах з нафтопродуктами." Проблеми пожежної безпеки, 43, 22-28.

7. Шевченко С. В., Андрющенко Д. В., Мартинюк І. О. (2019) - "Проблеми та перспективи вдосконалення системи пожежної безпеки на резервуарних парках." Техногенна безпека, 2, 57-62.

8. 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.

9. J. Wang, T. Jin, & J. Xue (2019) - "Mechanical behavior of oil storage tanks exposed to fire: Thermal analysis and structural response." Journal of Constructional Steel Research, 153, 307-315.

10. W. Zhang, L. Zhang, X. Luo, & J. Qiu (2016) - "Experimental and numerical investigation on the fire resistance of steel storage tanks with different liquid levels." Fire Safety

Journal, 82, 70-80.
11. X. Yu, Y. Li, & H. Bai (2020) - "Numerical simulation of thermal and structural response of large oil storage tanks under fire conditions." Engineering Failure Analysis, 115, 104620.
12. D. Marzocca, S. Hooper, & D. Budny (2017) - "Structural analysis of welded joints in large storage tanks exposed to blast loads." International Journal of Pressure Vessels and Piping, 155, 48-57.
13. Несух М.М., Субота А.В., Експериментальне дослідження міцності зварних з'єднань при відриві вертикальних сталевих резервуарів від днища під час пожежі. Вісті Донецького гірничого інституту №1 (54), 2024. 92-103. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-92-103
14. Belytschko, T., Tsay, C. S. (1981). "A stabilized co-rotational finite element for non-linear analysis of structures." International Journal for Numerical Methods in Engineering, 17(5), 632-664. DOI: 10.1002/nme.1620170508.
15. Paganini, C., Carbone, A. (2018). "A study on the bilinear Prandtl model for metal forming processes." Computational Mechanics, 61(4), 573-586. DOI: 10.1007/s00466-017-1441-3.
16. Flanagan, D. P., & Belytschko, T. (1981). "A Comparison of the Accuracy of Finite Element Analysis Methods for Plasticity Problems." In International Journal for Numerical Methods in Engineering (Vol. 17, pp. 779-795).
17. Reddy, J. N. (2006). "Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells." CRC Press.
18. Cooper, J. R., & Simonds, R. C. (1986). "The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Materials: A New Model for Dynamic Plasticity." In Proceedings of the 8th International Symposium on Ballistics (pp. 467-478).

References

1. World Fire Statistics 2011-2023. URL: https://www.ctif.org/world-fire-statistics. (Accessed: 05.03.2024).
2. Information and Analytical Report on Emergency Situations in Ukraine from 2018-2022. URL: https://dsns.gov.ua/uk/operational-information/nadzvicaini-situaciyi-v-ukrayini-2/dovidka-za-rik (Accessed: 05.03.2024).
3. Kovalenko, M. M., Syvak, V. V. (2016) - "Features of Fire of Petroleum Products in Tanks and Fire Protection Measures." Fire Safety, 1, 12-18.
4. Gryshchenko, V. V., Kobzev, I. S. (2015) - "Analysis of Fire Safety of Petroleum Storage Facilities." Collection of Scientific Papers of the Ukrainian Scientific Research Institute of Civil Protection, 2(30), 35-41.
5. Omelchenko, I. I., Rudy, K. M., Matyash, V. H. (2017) - "Risk Assessment of Fires in Tank Farms." Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine, 26, 91-97.
6. Horbatiuk, M. V., Hladkyi, R. V., Lysenko, I. I. (2018) - "Methods of Ensuring Safety during Fires in Petroleum Storage Tanks." Fire Safety Issues, 43, 22-28.
7. Shevchenko, S. V., Andriushchenko, D. V., Martyniuk, I. O. (2019) - "Problems and Prospects of Improving the Fire Safety System in Tank Farms." Technogenic Safety, 2, 57-62.
8. Chernevskyi, V. V. The Impact of Fire Thermal Factors on the Integrity of Vertical Steel Tanks with Petroleum Products: PhD Thesis. Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2015. 121 p.
9. Wang, J., Jin, T., & Xue, J. (2019) - "Mechanical Behavior of Oil Storage Tanks Exposed to Fire: Thermal Analysis and Structural Response." Journal of Constructional Steel Research, 153, 307-315.
10. Zhang, W., Zhang, L., Luo, X., & Qiu, J. (2016) - "Experimental and Numerical Investigation on the Fire Resistance of Steel Storage Tanks with Different Liquid Levels." Fire Safety Journal, 82, 70-80.
11. Yu, X., Li, Y., & Bai, H. (2020) - "Numerical Simulation of Thermal and Structural Response of Large Oil Storage Tanks under Fire Conditions." Engineering Failure Analysis, 115, 104620.
12. Marzocca, D., Hooper, S., & Budny, D. (2017) - "Structural Analysis of Welded Joints in Large Storage Tanks Exposed to Blast Loads." International Journal of Pressure Vessels and Piping, 155, 48-57.
13. Nesukh, M. M., Subota, A. V. Experimental Study of the Strength of Welded Joints During the Detachment of Vertical Steel Tanks from the Bottom During a Fire. Donetsk Institute of Mining Bulletin No.1 (54), 2024. 92-103. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-1-92-103
14. Belytschko, T., Tsay, C. S. (1981). "A Stabilized Co-Rotational Finite Element for Non-Linear Analysis of Structures." International Journal for Numerical Methods in Engineering, 17(5), 632-664. DOI: 10.1002/nme.1620170508.
15. Paganini, C., Carbone, A. (2018). "A Study on the Bilinear Prandtl Model for Metal Forming Processes." Computational Mechanics, 61(4), 573-586. DOI: 10.1007/s00466-017-1441-3.
16. Flanagan, D. P., & Belytschko, T. (1981). "A Comparison of the Accuracy of Finite Element Analysis Methods for Plasticity Problems." International Journal for Numerical Methods in Engineering, 17, 779-795.
17. Reddy, J. N. (2006). "Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells." CRC Press.
18. Cooper, J. R., & Simonds, R. C. (1986). "The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Materials: A New Model for Dynamic Plasticity." Proceedings of the 8th International Symposium on Ballistics, 467-478.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Поздєєв, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна.

Автор: НЕСУХ Михайло Михайлович
старший викладач кафедри міського будівництва та господарства
Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»
E-mail – mikenesukh@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2561-110X

Автор: СУБОТА Андрій Вікторович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри міського будівництва та господарства
Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»
E-mail – andriysubota87@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8605-344X

Автор: ШВИДЕНКО Андрій Валерійович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України
E-mail – andwell1980@gmail.com
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7708-8595

Автор: НЕКОРА Ольга Валеріївна
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України
E-mail – ov_nekora@ukr.net
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5202-3285

RESEARCH ON THE DESTRUCTION PROCESSES OF WELDED JOINTS UNDER CONDITIONS OF DETACHMENT OF THE VERTICAL STEEL TANK BODY FROM THE BOTTOM DURING A FIRE

M. Nesukh[1], A. Subota[1], A. Shvydenko[2], O. Nekora[2]
[1]State Higher Educational Institution "Uzhhorod National University", Ukraine
[2]Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

The study presents a comprehensive analysis of welded joints by applying advanced mathematical modelling and experimental research methods. The primary objective was to develop and validate a methodology for mathematical modelling of the behaviour of welded joints under mechanical loading, as well as to assess the effectiveness of the proposed approaches in predicting their strength and durability. Based on the research results, we can draw the following conclusions.

The authors obtained the results of welded joint samples and analysed the corresponding curves of the dependence of force factors on their deformations.

The study showed that the destruction of welded joints occurs mainly along the weld seam, where the strength is lower than in the base material of the rods. It is consistent with the practical data of the experiment, which confirms that the weld is the weakest link in the structure.

The article substantiated a set of provisions and assumptions for implementing mathematical modelling of the behaviour of samples of welded joints imitating welded joints in a reservoir for petroleum products under mechanical tensile tests.

The test results justified the mathematical models of the steel material of welded joints of petroleum product tanks and obtained numerical parameters of the mechanical properties of steel of welded joints. Yield strength is in the range of 240–300 MPa, the modulus of elasticity is 190–240 GPa, the hardening modulus is 18–20 GPa, and the ultimate plastic deformation is 0.00334.

Based on a complex of well-founded mathematical models of welded joints, we carried out calculations regarding the numerical study of the behaviour of welded joints under the conditions of their mechanical tests.

We compared the obtained results with the results of experimental tests and, based on this comparative analysis, established that they were adequate since the Fisher criterion did not exceed the tabular value and the relative error did not surpass 12%.

The findings of this research offer valuable insights and practical recommendations for improving the design and evaluation of welded structures, enhancing their performance and safety in engineering applications.

Keywords: *static tensile testing, welded joints, oil products, fire, steel tanks.*