

# ASIM PSS-2 & ISO 24817 Сертифікаційний документ WrapMaster PermaWrap™

PN119140CRA

Підготовлено для  
компанії Wrap Master, Inc.  
Лонгв'ю, штат Техас

Підготовлено:   
Кріс Александер, доктор,  
Дипломований інженер, керівник



  
Ланс Стаудачер  
Партнер



Травень 2012 року

## РЕЗЮМЕ ПРОЕКТУ

Компанія Stress Engineering Services, Inc (SES) почала роботу в 2000 році для оцінки системи композитного ремонту WrapMaster PermaWrap™, виробленого компанією WrapMaster. Протягом усього цього періоду основний акцент було зроблено на оцінці здатності PermaWrap™ відновлювати пошкоджені трубопроводи високого тиску для газів та рідини. Пошкодження в контексті композитного армування включали ремонт корозії, вм'ятин і періодичних пошкоджень.

У цьому звіті наводиться вичерпний огляд робіт з випробування та аналізу, проведених СЕС для оцінки продукту PermaWrap™. Слід зазначити, що деякі випробування були проведені на PermaWrap™, що не представлено детально в цьому звіті. Основна увага в цій презентації полягає в наданні документації для перевірки працездатності PermaWrap™ у зміцненні пошкоджених корозією трубопроводів для задоволення проектних вимог стандарту ASIM PCC-2-2011, ремонт обладнання під тиском і трубопроводів (зокрема, частина 4: Ремонт без металу та зклеюванням). Задля відповідності вимогам цього стандарту, компанія WrapMaster вирішила скористатися дизайнерськими рівняннями, які вимагають значення 1000-годинного довгострокового випробування матеріалу на міцність. В даний час проект будь-якого ремонту від компанії Wrap Master гарантує, що його складове проектне навантаження не перевищує 10 445 ф/дюйм<sup>2</sup>, що складає приблизно 1/9 від короткострокового навантаження на розтягнення композитного матеріалу (тобто середнє зусилля на розрив у 91500 ф/дюйм<sup>2</sup>). Зрозуміло, що дане проектне навантаження (і відповідна композитна товщина конструкції) було відповідним чином обрано, тому що коли матеріали PermaWrap™ використовуються для відновлення глибокої 75%-ї корозії в трубах 12,75x0,375 дюймів класу X42, деформації в армований кородований ділянку труби на максимально допустимому робочому тиску (МДРТ) у 72% від МДРТ, обмежено до 2,067 від значення мікронапруження (тобто 0,2%). Не менш вражаючим, коли ця сама ремонтна збірка піддавалася змінам тиску в діапазоні 36% ММДМ (тобто від 36 до 72% ММДМ), зразок піддавався тиску протягом 129409 циклів до того, як у області корозії під ділянкою ремонту з'явилася протікання. Для газопроводу цей проектний термін служби становить приблизно 39 років з урахуванням помірно агресивного режиму тиску.

На додаток до повномасштабного випробування представлені результати випробувань матеріалів, що були виконані для задоволення вимог АСІМ РСС-2. Критична частина цього процесу вимагає, щоб процес проектування, який використовувався у WrapMaster, відповідав або перевищував вимоги, викладені в РСС-2. З випробування продуктивності, а також з прикладу проблеми, що наводиться в цьому звіті, зрозуміло, що проект WrapMaster PermaWrap™ відповідає мінімальним вимогам, викладеним в АСІМ РСС-2. Крім того, повномасштабні експерименти, такі як цикл випробувань відремонтованої труби з 75% корозії на розрив та тиск, надають конкретну інформацію про продуктивність PermaWrap™ в реальних умовах експлуатації.

В даний час одна з переваг у виконанні кількох галузевих дослідницьких програм з композитного ремонту для таких організацій, як Міжнародна організація з досліджень трубопроводів (МОДТ) і Служби управління мінералами США (ММС) полягає в тому, що оператори можуть порівнювати відносні показники конкуруючих композитних технологій. Крім того, зацікавленим читачам пропонується подивитися на малюнок 6, що показує виміряні значення деформацій для PermaWrap™, які перераховані разом з іншими конкуруючими системами в дослідженні МОДТ (програма МОДТ MATR-3-4, програма з оцінки довгострокової ефективності композитних систем ремонту). У цій конкретній програмі проходять випробування 12 різних композитних систем ремонту, які включають ремонт заглиблених зразків труб під тиском, які періодично вилучаються з залягання для випробування на розрив. Декілька учасників мають зразки, заглиблені щонайменше на 3 роки, і один з них – компанія WrapMaster.

У Додатку С наведена стаття "Відновлення вм'ятин, підданих дії циклічного тиску з використанням композитних матеріалів", яка була опублікована на Міжнародній конференції щодо стану трубопроводів у Калгарі 2010 року, яка включає результати випробування WrapMaster у ремонті звичайних вм'ятин, вм'ятин на кільцевих та контактних зварних швах.

Нарешті, хоча існують незначні відмінності між стандартами ACIM PCC-2, Стаття 4.1, та ISO 24817, використання цих двох стандартів для всіх практичних цілей дозволить виготовити один і той же тип проекту композиту. Таким чином, композитна ремонтна система, що використовується для ремонту трубопроводів високого тиску для газу або рідини, що відповідає проектним вимогам PCC-2, задовольняє проектним вимогам, зазначеним в ISO 24817.

## 1.0 ВСТУП

Цей документ містить оцінку WrapMaster PermaWrap з урахуванням двох різних методів оцінювання: Проектні розрахунки АСІМ РСС-2 та вимірювання деформацій, записані під час випробування на розрив і циклічних випробувань під тиском зразку труби з глибиною корозії 75%. Протягом останніх років розроблено деформаційну конструкцію композиційних систем ремонту як аналітично, так і експериментально.

Важливим елементом верифікації PermaWrap™ було виконання пункту 4.1 РСС-2 АСІМ, обов'язковий додаток V Вимірювання даних випробувань продуктивності, розділ V-2.1. випробування включало зміцнення трьох (3) 6-футових труб 12,75-дюймів x 0,375-дюймів класу Х42 з використанням 0,188 дюймів PermaWrap™. Зразки піддавали тиску до 3,350 ф/дюйм<sup>2</sup> протягом 1000 годин без інцидентів. Отримана довгострокова міцність,  $S_{It}$ , для PermaWrap™ становила 20,445 ф/дюйм<sup>2</sup>. На додаток до виконання мінімальних вимог Додатку V, випробування на розрив були також проведені на всіх трьох тестових зразках після 1000-годинних випробувань для перевірки, чи не відбулись втрати міцності.

У наступних розділах цього документа вказано таке:

- Перевірка з урахуванням АСІМ РСС-2, включаючи приклад проблеми
- Перевірка з урахуванням експериментальних методів проектування на основі деформацій, що включають повномасштабні випробування на розрив та втому під час циклів під тиском
- Кваліфікаційні випробування за АСІМ РСС-2
  - Додаток II - Випробування на витривалість обмотки
  - Додаток V - 1000-годинний тест для встановлення довготривалої міцності
- Додаткове випробування
  - Випробування на витривалість під час циклу тиску
  - 10-річна програма довгострокового випробування (фінансується спільно з Міжнародною радою з досліджень трубопроводів)

## 2.0 ПЕРЕВІРКА З РОЗГЛЯДОМ АСІМ РСС-2

Розробка ремонтної системи PermaWrap™ передувала розробці АСІМ РСС-2, ремонту обладнання і трубопроводів під тиском. Частина 4 цього документа, "Неметалевий та клеєвий ремонт", стосується специфічних вимог до систем композитного ремонту і може бути використана для визначення відповідної товщини композитного ремонту для даного корозійного дефекту. Засада проекту згідно з АСІМ РСС-2 полягає у визначенні цільового проектного тиску, який може бути досягнутий для пошкодженої труби, доки композитний матеріал забезпечить достатній рівень посилення. Крім того, важливо, щоб напруження в композитному матеріалі обмежувалася прийнятними рівнями під час наддуву тиском для забезпечення тривалої роботи.

Важливим фактором для проектною товщини композиту є те, що напруження в композиті за проектних умов не повинні перевищувати певного відсотка від характерної міцності композиту на розрив. Як орієнтир для цієї конкретної проектною межі, АСІМ доручив команді Hydrogen Project завдання з розробки керівних принципів для питань проектування у виробництві композитних баків для водню високого тиску. Результатом зусиль, вироблених АСІМ STP/PT-005, є *рекомендації щодо проектного коефіцієнту для водневих баків високого тиску*<sup>1</sup>. Цей документ надає рекомендовані проектні фактори відносно

короткочасного впливу тиску на розрив та проміжних меж для розриву через довготривалу напругу на основі фіксованого 15-річного терміну експлуатації повністю упакованих та обгорнутих композитних резервуарів з металевими вкладишами. Частина цих зусиль включала перегляд розрахункових меж між вибуховим і максимально припустимим робочим тиском для резервуарів, виготовлених з використанням композитних матеріалів. Більшість міжнародних конструкторських нормативів мають розрахункову межу 2 для обгорнутих обручами баків і середнє значення порядку 2,5 для повністю загорнутих баків. Додатково, керівні принципи проектування надаються відносно межі впливу, що відображено в наступному тексті цього документа.

Правила повинні дозволяти уточнення необхідного терміну експлуатації. Однак для цього необхідно розробити методологію проектування, яка враховує розрив через перевантаження для композитних резервуарів. До того часу, поки не буде розроблена така методологія проектування, рекомендується використовувати фіксований 15-річний термін експлуатації та 0,4 коефіцієнта напруги для танків, обгорнутих кільцями (STP/PTY-005, стор. 11).

Результати механічних випробувань для WrapMaster PermaWrap™ надані в **Додатку Б**. Дані в цьому додатку показують, що існує короткострокова нижня межа міцності при розтягуванні,  $s_c$ , у 82,747 ф/дюйм<sup>22</sup>. Довготривала міцність на розрив,  $s_t$ , 20,445 фунт/дюйм<sup>2</sup>, максимально

<sup>1</sup> Інструкції з параметрів проектування 2006 року для композитних баків високого тиску, STP/PTY-005, Американське товариство інженерів-механіків; Нью-Йорк, 2006

<sup>2</sup> Це значення ґрунтується на результатах випробувань з металургійної лабораторії Х'юстона, де середнє напруження розриву склало 91500 ф/дюйм<sup>2</sup> зі стандартним відхиленням 4376 ф/дюйм<sup>2</sup> Отримане середнє значення

допустиме напруження у композиті не повинна перевищувати 10,223 фунт/дюйм<sup>2</sup> (використовуючи сервісний коефіцієнт 0,5 з Таблиці 4 у АСІМ РСС-2 для даних випробувань тривалістю 1000 годин). Таким чином, граничний рівень розрахункової напруги для PermaWrap™ становить 12,3% від короткострокової проектної міцності, або іншими словами – PermaWrap™ розроблено таким чином, що коефіцієнт безпеки 8.1 накладається на нижню межу короткострокової міцності 82747 фунт/дюйм<sup>2</sup> (або коефіцієнт безпеки 8,9 на середню короткочасну міцність 91500 фунт/дюйм<sup>2</sup>).

**Таблиця 1 – Розрахункові напруги як функція розрахункового коефіцієнта РСС-2**

Випробування	Розрахунковий коефіцієнт	Проектне навантаження PermaWrap™ де $s_{it} = 20,445$ ф/дюйм <sup>2</sup>	Фактор безпеки, що базується на міцності композиту на розтягування	
			Нижня межа 82 747 ф/дюйм <sup>2</sup>	Середнє значення 91 500 ф/дюйм <sup>2</sup>
дані за 1000 годин	0,5	10 223 ф/дюйм <sup>2</sup>	8,1	8,9
Проектні дані ресурсу	0,67	13 698 ф/дюйм <sup>2</sup>	6,0	6,7

Посилаючись ще раз на таблицю 4 АСІМ РСС-2, для PermaWrap™ розраховуються наступні коефіцієнти безпеки, засновані на визначених робочих показниках РСС-2, *f*. Незважаючи на те, що проектне напруження композиту є важливим, однаково важливим є коефіцієнт безпеки щодо короткочасної міцності на розрив. У РСС-2 достеменно незрозуміло, що потрібно для встановлення робочого показника 0,5 проти 0,67; однак, для обережності WrapMaster вибрав більш обережний показник. Слід зазначити, що технічний випадок може бути використаний для застосування менш консервативного робочого показника 0,67 під час розробки WrapMaster PermaWrap™ з наступної низки причин:

- Для перевірки впливу довготривалого навантаження були завершені 1000-годинні випробування,  $s_{it}$ .
- PermaWrap™ було використано для ремонту випробувального зразка з рівнем корозії 75% (з використанням стандартного ремонту товщиною 0,52 дюйма) з урахуванням 129409 циклів під тиском за 36% МДРТ. Застосовуючи коефіцієнт безпеки 10 на цикли на невиконання проектного терміну, це відповідає приблизно 13000 проектних циклів. Для типового газопроводу цей проектний ресурс становить приблизно 39 років експлуатації (13000 циклів/337 циклів на рік) для помірковано агресивного газопроводу з таким важким дефектом у діапазоні напружень у 36% МДРТ (див. таблицю нижче з Оцінки рівня втоми матеріалу для

у мінус два стандартних відхилення становить 87747 фунт/дюйм<sup>2</sup>

контролю цілісності трубопроводів під авторством Кіфнера та ін.)<sup>3</sup>.

Відсоток ММДМ	Дуже агресивно	агресивно	Помірно	Легко
72	20	4	1	0
65	40	8	2	0
55	100	25	10	0
45	500	125	50	25
35	1000	250	100	50
25	2000	500	200	100
Загалом	3660	912	363	175
Єдине еквівалентне число циклів з $\Delta P$ , як зазначено				
72%	276	67	25	10
36%	3 683	889	337	128

- Нарешті, та найважливіше, результати випробувань показують, що коли PermaWrap™ використовується для ремонту корозійної ділянки труби, деформації сталі у ділянці ремонту значно знижуються. Розглянемо результати для робочого тиску у 72% ММДМ на ділянці з корозією труби на рівні 75%, як зазначено нижче. Проведено вимірювання деформацій для вимірювальних приладів, розташованих на корозійній ділянці, відремонтованій композитом.
  - Статичне випробування тиском (результати 72% ММДМ, 1,780 ф/дюйм<sup>2</sup>)
    - Результати випробувань PermaWrap™ 2 069  $\mu\epsilon$
    - Середні промислові показники для випробування МОДТ (перевірено 12 різних систем)
      - Усі системи: 3,734  $\mu\epsilon$
      - Тільки скло E: 4,497  $\mu\epsilon$  (3,771  $\mu\epsilon$  – див. посилання<sup>4</sup>)
      - Тільки вуглець: 2 524  $\mu\epsilon$
  - Циклічне випробування під тиском, де  $\Delta P$  = 36-72% ММДМ (від 890 до 1780 фунт/дюйм<sup>2</sup>)
    - Циклічне випробування під тиском: 2,189  $\mu\epsilon$  (після 100 циклів)
    - Циклічне випробування під тиском: 3 061  $\mu\epsilon$  (після 50 000 циклів)

<sup>3</sup> Кіфнер Дж. Ф. та ін., Оцінка рівня втоми матеріалу для контролю цілісності трубопроводів, документ № IPC04-0167, представлений на Міжнародній конференції з дослідження цілісності трубопроводів, м. Калгарі, Канада, 4 – 8 жовтня 2008 року.

<sup>4</sup> Одна система E-glass мала деформації 8,036 мкм у зоні ремонту, що викривило середні результати для матеріалу E-glass. Однак ці дані включені, оскільки цей продукт був законним складовим компонентом виконаних ремонтів по всьому світу

У наступному розділі цього документа, «Верифікація з урахуванням експериментальних методів розробки на основі деформації», наведені конкретні деталі щодо вищевказаних значень деформацій і тестових програм, які використовувалися для їх генерування.

Нижче наводиться приклад проблеми, щоб продемонструвати, як розраховується товщина композиту з використанням розробки проекту АСІМ РСС-2.

#### Приклад проблеми

Розглянемо глибину корозії 40% у трубопроводі класу X52, 12,75 x 0,375 дюймів. Як показано в розрахунках з WrapMax на **Зображенні 1**, використовується стандартна товщина 0,52 дюйма.

Розрахунки проводяться з використанням методів АСІМ РСС-2 (Рівняння 11), як показано на **Зображенні 2**. Є кілька варіантів для розрахунку товщини композиту для РСС-2. З Розділу 3.4.5 (Ремонт допустимих навантажень, що допускаються вальцюванням та визначаються тестуванням продуктивності) Рівняння (10) не включає внесок корозійної залишкової зв'язки труб, тоді як Рівняння (11) дозволяє цей внесок. Презентація на **Зображенні 2** базується на формулі (11) і дає необхідну товщину у 0,229 дюйма.

Посилаючись на інформацію, наведену в Таблиці 1, яка стосується факторів обслуговування РСС-2 (f), розглянемо наступне:

- Розрахована товщина зони ремонту
  - $f = 0.5$        $t_{\text{PCC-2}} = 0.229$  дюйма
  - $f = 0.67$        $t_{\text{PCC-2}} = 0.171$  дюйма
- Фактична товщина зони ремонту
  - $t_{\text{wrapmax}} = 0.52$  дюйма

Слід зазначити, що система PermaWrap має додатковий закладений коефіцієнт безпеки для ремонту з втратою товщини стіни менше 55%. Ремонт PermaWrap майже завжди складається з 8 обгортань товщиною 0,52 дюйма, навіть якщо РСС-2 дозволить тонший ремонт. Цей коефіцієнт безпеки зображений графічно на **Зображенні 3**.

<b>Компанія WrapMaster, Inc.</b>	<b>ПІ 8021</b>	<b>Лонгв'ю, штат Техас 75607</b>	<b>(903)643-8080</b>
----------------------------------	----------------	----------------------------------	----------------------

## Специфікації WrapMax

Назва Компанії.....:	
Локація.....:	
Дата.....:	
Зовнішній діаметр труби (D) у дюймах.....:	12,75
Товщина стінки труби (T) у дюймах.....:	0,375
Крепость стали (ММДМ) фунт/дюйм <sup>2</sup> .....:	52000
Максимально дозволений тиск (МДТ) #/дюйм <sup>2</sup> : (МДТ) Обмеження.....:	2202
Клас (Параметр проектування).....:	0,72
Максимальна довжина за довготою зони дефекту (L), дюймів:	24
Максимальна глибина дефектів (D), дюймів.....:	0,15
Розрахунковий параметр (B).....:	1,0

### - - ОЦІНЮВАННЯ МДТ У ЗОНАХ ДЕФЕКТІВ - -

Проміжний фактор (A) : 9,801		
Проектний тиск (P) : 2202,00 ф/дюйм <sup>2</sup>	Максимальна глибина: 0,034	A = 9.801
Безпечний тиск (p') : 1453,00 ф/дюйм <sup>2</sup>	Максимальна довжина: 2,326	A = 0.950

### - - ВЗІГ КОМЕНТАРІ ПЕРЕД ПІДСИЛЕННЯМ - -

Знизити робочий тиск, щоб він не перевищував 1453 фунти/дюйм<sup>2</sup>, тому труба функціонуватиме легально і безпечно.

### - - РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ WRAPMAX - -

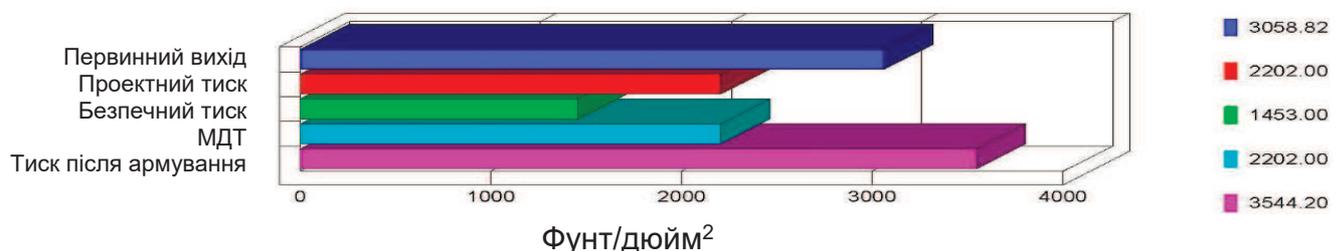
Проектний тиск армованої труби.....:	3544,20
Вихідний тиск армованої труби.....:	3058,82
Проектний/Вихідний тиск.....:	1,16
Периферійний вплив дефекту.....:	40,06

### СТАНДАРТНИЙ РЕМОНТ ЗА ДОПОМОГОЮ PERMAWRAP ПРИЙНЯТНИЙ

Ремонт вважається безпечним, якщо розрахунковий тиск для армованої труби перевищує вихідний тиск для первинної труби, якщо глибина дефекту не перевищує 80% від товщини стінки труби.

Периферійний ступінь труба/байпас.....:	1,0
Шкала коефіцієнта текучості (m).....:	1,0
Зміцнення деформації.....:	1,0
Товщина армування обгортання.....:	0,52 дюйма
Проектна товщина армування обгортання.....:	20000 ф/дюйм <sup>2</sup>
Модуль армування обгортання.....:	5500000 ф/дюйм <sup>2</sup>
Модуль пружності труби.....:	30000000 ф/дюйм <sup>2</sup>

### Діаграма тиску



Авторське право © 2001 Компанія WrapMaster Inc. Усі права достимано  
 Відтворення або копіювання зображень заборонено.

### Зображення 1 – Розрахунки WrapMax

### Розрахунок товщини композиту для тестування за допомогою PermaWrap

АСІМ РСС-2 Стаття 3.4.5 Дозволені навантаження на ремонтне покриття, визначені тестуванням продуктивності

Метою цієї сторінки розрахунків є визначення необхідної кількості обгортань для ремонту корозії труби за допомогою WrapMaster PermaWrap. Потрібне рівняння – це Рівняння (11), яке обчислює мінімальну прийнятну товщину ремонту з урахуванням товщини сталі

Вказана мінімальна межа стійкості труби до деформації (ММДМ):  $s := 52000 \text{ ф/дюйм}^2$

Номинальна товщина стінки вихідної труби:  $t := 0.375 \text{ дюйм}$

Зовнішній діаметр труби:  $D := 12.75 \text{ дюйм}$

Глибина корозії (у відсотках): Корозія := 40 %

Мінімальна залишкова товщина стінки труби:  $t_s := t (1 - \text{корозія})$   $t_s = 0.225 \text{ дюйма}$

Тривала міцність на розрив:  $S_{It} := 20445 \text{ ф/дюйм}^2$

Характеристика міцності на розрив:  $S_C := 66623 \text{ ф/дюйм}^2$

Розрахунковий коефіцієнт для ремонтних облицювань з Таблиці 4 (дані за 1000 год):  $f = 0,50$

Розрахунковий тиск за АСІМ В31.8 (841.11 (а) за  $F = 0.72$ ):  $P := \left(\frac{2st}{D}\right) 0.72$   $P = 2202 \text{ ф/дюйм}^2$

АСІМ РСС-2 Стаття 3.4.5 Дозволені навантаження на ремонтне покриття за тестуванням продуктивності

Рівняння (11) з Розділу 3.4.5:  $t_{repair} := \left(\frac{PD}{2} - t_s S\right) \left(\frac{1}{f S_{It}}\right)$   $t_{repair} = 0.229 \text{ дюйм.}$

Необхідна кількість обгортань:  $t_{wrap} = 0.0625 \text{ дюйм} N_{wraps} := \frac{t_{repair}}{t_{wrap}}$   $N_{wraps} = 4$

Додаткові розрахунки для визначення тиску на розрив з урахуванням композитного армування та мінімальної міцності труби на розрив.

Максимальна міцність трубопроводу на розрив за один Протокол заводських випробувань:  $S_{uts} := 66000 \text{ ф/дюйм}^2$

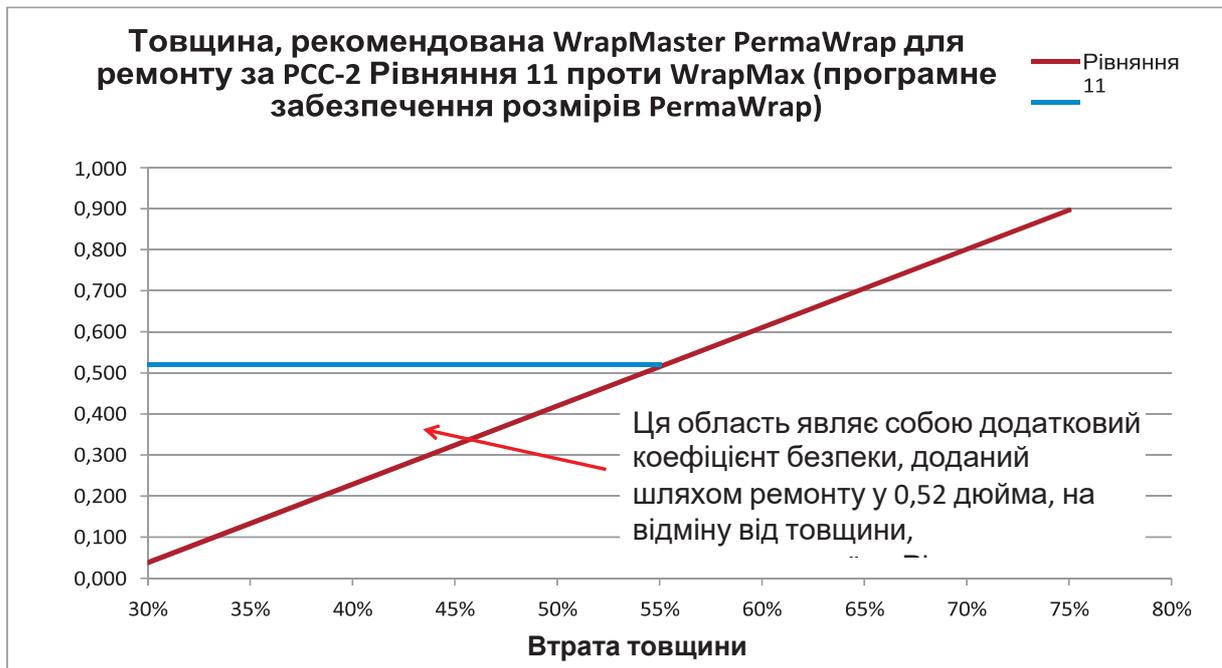
Тиск розриву підсиленої ділянки:  $P_{burst} := \frac{2 S_{uts} t_s}{D} + \frac{2 S_C t_{repair}}{D}$   $P_{burst} = \text{ф/дюйм}^2$

Тиск розриву нової труби (мінімум):  $P_{burst\_new} := \frac{2 S_{uts} t}{D}$   $P_{burst\_new} = 3882 \text{ ф/дюйм}^2$

Максимально дозволений робочий тиск (МДРТ):  $P_{MAOP} := \frac{0.72 2 s t}{D}$   $P_{MAOP} = 2202 \text{ ф/дюйм}^2$

Коефіцієнт розриву посилень відносно МДРТ:  $ratio_{SF} := \frac{P_{burst}}{P_{MAOP}}$   $ratio_{SF} = 2.144$

### **Зображення 2 – розрахунки за АСІМ РСС-2 (виконано з використанням ПЗ MathCAD)**



**Зображення 3 – Товщина ремонту на основі втрат товщини стінки**

### 3.0 ВЕРИФІКАЦІЯ ЩОДО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ НА ОСНОВІ ДАНИХ ПРО РОЗТЯГНЕННЯ

Методи проектування на основі деформації використовуються для розрахунку максимального навантаження, яке дана структура може витримати до відмови. Для трубопроводів, підданих збільшенню внутрішнього тиску, відмова подається як перевантаження по тиску або розрив. Як тільки це значення визначається або аналітично, або експериментально, розрахункове навантаження (тобто тиск) обчислюється шляхом встановлення передбаченого запасу конструкції. Залежно від конкретного коду або стандарту галузі, межі для проектів на основі деформації зазвичай коливаються від 1,5 до 2,0.

Є кілька варіантів, доступних інженерам для використання методів проектування на основі деформації. Кінцево-елементний аналіз часто використовують для визначення проектної потужності заданої структури на основі розрахункового пластичного руйнування. Крім аналітичних методів використовуються також експериментальні методи. При розгляді композитного ремонту, однією з переваг використання експериментальних методів над чисельними (тобто аналітичними) методами розрахунку є те, що невизначеність властивостей матеріалу, пов'язана з матеріалами наповнювачів, клеїв і самого композитного матеріалу не перешкоджає визначенню точного граничного навантаження.

У цьому розділі документа наводяться конкретні подробиці двох експериментальних досліджень, проведених на PermaWrap™ для перевірки рівня армування, що встановлюється на ділянку труби з корозією.

- Випробування на розрив труби класу X42 12,75 x 0,375 дюймів з рівнем корозії 75%.
- Випробування на тиск труби класу X42 12,75 x 0,375 дюйма з ступенем корозії 75% за значень від 890 до 1780 ф/дюйм<sup>2</sup> до відмови (36% діапазону впливу ММДМ)

Розріз корозії шириною 6-дюймів та довжиною 8 дюймів був виконаний в трубі, як показано на **Зображенні 4**. Після завершення механічної обробки зразок шліфували піскоструменевим апаратом до білого металу. Перед нанесенням композитного матеріалу для ремонту на кожному зразку було встановлено три тензорезистори, і один – після ремонту в наступних областях, як зазначено нижче і показано на **Зображенні 5**.

- Давач №1: Давач встановлено в центрі ділянки, враженої корозією
- Давач №2: Давач встановлено в 2-х дюймах від центру ділянки, враженої корозією

- Давач №3: Давач встановлений на основній трубі
- Давач №4: Давач встановлений на зовнішній поверхні виконаного ремонту

Два тензорезистори, встановлені в області виникнення корозії (Gages # 1 і # 2), були надзвичайно важливі для кількісного визначення рівня армування, забезпеченого композитним матеріалом. Протягом останніх двох років компанія Stress Engineering Services, Inc. провела понад 60 випробувань складових систем ремонту. Тензорезистори, що підлягають моніторингу під час цих випробувань на розрив, вказують на ефективність композитного матеріалу. При належному функціонуванні композитні матеріали забезпечують утримання та контроль деформацій у пошкодженій частині труби на належному рівні. Зазначений рівень прийнятності базується на вимогах до продуктивності; однак, для циклічного обслуговування рекомендується, аби діапазони деформацій становили менше 0,35% (70% від 0,5% деформації, де зазначена мінімальна вихідна міцність визначається як напруження сталі за 0,5% загальної деформації).

Для ремонту як зразків розриву, так і втоми, виконувалися розрахунки з використанням WrapMax. Звертаючись ще раз до знімку на **Зображенні 1**, ремонт області з рівнем корозії 75% вимагав 8 обгортань. Для WrapMaster PermaWrap™ це відповідає товщині 0,52 дюйма (кожен шар має розмір приблизно 0,0625 дюйма). Всі ремонтно-монтажні роботи виконував персонал від WrapMaster.

У розділах, наведених нижче, докладно обговорюються результати випробувань на розрив і втому після циклу тиску відповідно.

### 3.1 Результати тестування на розрив

Зразок розриву піддавали тиску до відмови і розриву при 4024 ф/дюйм<sup>2</sup>. Відмова виникла за межами зони ремонту базової трубі. На **Зобр. 6** показані результати тензометричного вимірювання, які були піддані моніторингу під час тестування зі швидкістю 1 сканування в секунду. На **Зобр. 6** також включені середні показники деформації з довгострокового дослідження МКДТ для тензорезисторів, розташованих під композитними матеріалами 12 різних систем ремонту. За МДТ (72% ММДМ або 1778 ф/дюйм<sup>2</sup>) деформація обруча складала 2,067 мкм/м<sup>5</sup>. Додатково, при 100% ММДМ (2,470 ф/дюйм<sup>2</sup>) деформація під шаром PermaWrap™ була зареєстрований як 3,328 мкм/м. Слід зазначити, що набір даних МКДТ включає в себе ряд

<sup>5</sup> Зауважимо, що 10000 мкм/м відповідає 1% деформації. В якості точки відліку, по API 5L, специфікація для трубопроводів лінії, вихідна міцність визначається за 0,5% деформації (або 5000 мкм/м)

композитних матеріалів, що включають Е-скло, вуглець і кевлар.

### 3.2 Результати випробувань на втому металу під час випробування на тиск

На додаток до випробування на розрив було завершено випробування на втому під час циклу під тиском. Незважаючи на те, що випробування на розрив є гарним показником загального підсилення за допомогою композитного матеріалу, випробування на втому у циклі роботи під тиском надають переконливі ознаки тривалого ресурсу ремонту. Це особливо вірно при розгляді результатів, пов'язаних із зразком із ступенем корозії у 75%, де є великий потенціал для генерації великих деформацій на ділянці труби, що зазнала корозії.

Використовуючи ту ж конфігурацію зразка, що і при вибірці зразків (як з точки зору геометрії дефекту зразка, так і з ремонту від PermaWrap™), було проведено випробування на втому під час циклу тиску. Ремонт включав 8 обгортань від PermaWrap™ (товщиною 0,625 дюйма). Під час тестування зразок піддавався тиску від 890 до 1780 ф/дюйм<sup>2</sup>. Дані деформації реєстрували, використовуючи ту ж конфігурацію на-х давачах, представлену раніше. Результати випробування циклом тиску представлені на **Зображенні 8**. Дані, показані на цій ділянці, реєстрували після 1000 циклів тиску, які були застосовані до досліджуваного зразка.

При огляді даних є кілька важливих спостережень.

- Як і очікувалося, максимальні деформації відбуваються в ремонтній зоні корозії; однак, навіть при 72% ММДМ максимальний зареєстрований рівень деформації становив 0,24% (тобто 2400 мкм/м).
- При огляді даних для Давача #1 вимірювання деформації становили від 1300 мкм/м до 2400 мкм/м. Це відповідає діапазону деформацій 1100 мкм/м.
- Мінімальний зафіксований діапазон деформацій стався в базовій трубі поза зоною ремонту (Давач # 3).

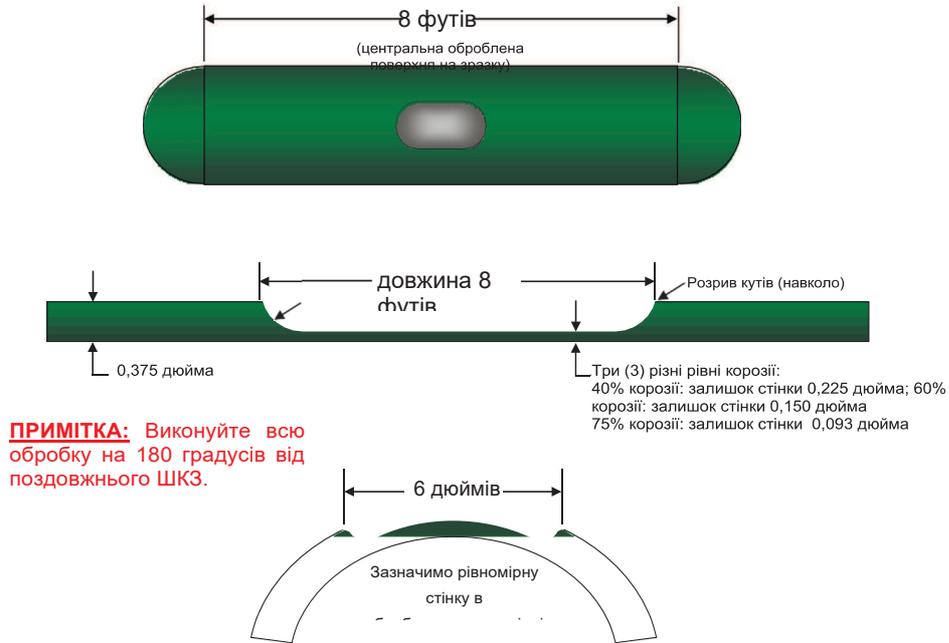
Дані були зафіксовані в певні періоди до 100 000 циклів з підсумком результатів, представлених у **Таблиці 2** та на **Зображенні 9**. Важливим у розгляді цих даних, особливо представлених на **Зображенні 9**, є те, що, незважаючи на збільшення максимальної деформації протягом 100 000 циклів (Давач Н1: 2,189  $\mu\epsilon$  до 3,061  $\mu\epsilon$ ), діапазон деформацій істотно не змінюється протягом циклу.

Зразок провалив випробування у вигляді витoku під ремонтом на ділянці корозії труби після того, як було пройдено 129409 циклів.

**Таблиця 2 – Результати тензометричних вимірювань, представлені як функція циклу**

Кількість циклів	Тип деформації	H1	A1	H2	A2	H3	A3	H4	A4
		µε	µε	µε	µε	µε	µε	µε	µε
100	Максимум	2189	201	2107	290	815	254	917	548
	Мінімум	1093	54	1071	110	371	112	290	246
	Діапазон	1097	148	1036	180	444	142	626	303
200	Максимум	2270	197	2168	293	822	253	867	641
	Мінімум	1154	51	1124	109	371	113	252	322
	Діапазон	1116	145	1044	184	451	140	615	319
500	Максимум	2347	199	2246	301	821	257	860	656
	Мінімум	1230	53	1204	117	372	115	256	343
	Діапазон	1117	146	1042	184	449	142	604	313
1 000	Максимум	2415	201	2317	306	826	259	860	667
	Мінімум	1298	50	1276	118	370	114	263	356
	Діапазон	1116	151	1041	187	456	145	597	311
2 000	Максимум	2464	209	2383	313	820	266	852	684
	Мінімум	1342	58	1335	122	364	119	262	375
	Діапазон	1122	151	1048	191	456	147	590	309
5 000	Максимум	2595	173	2470	347	826	282	840	622
	Мінімум	1463	16	1413	153	366	133	268	320
	Діапазон	1132	157	1057	195	460	150	572	302
10 000	Максимум	2819	5	2560	354	815	262	996	584
	Мінімум	1731	-139	1518	163	352	111	245	247
	Діапазон	1088	144	1042	191	463	151	751	337
20 000	Максимум	2928	23	2645	375	828	267	979	629
	Мінімум	1831	-115	1589	185	360	117	239	298
	Діапазон	1098	138	1056	190	467	150	740	331
50 000	Максимум	3061	-11	2529	701	821	311	1021	637
	Мінімум	2015	-144	1528	519	380	168	317	325
	Діапазон	1046	134	1001	182	441	143	705	312
100 000	Максимум	3021	50	2830	392	831	306	1137	864
	Мінімум	1880	-88	1759	187	359	153	396	531
	Діапазон	1140	138	1071	205	472	154	740	332

труба типу X42 12,75x0,375 дюймів (довжина 8 футів)

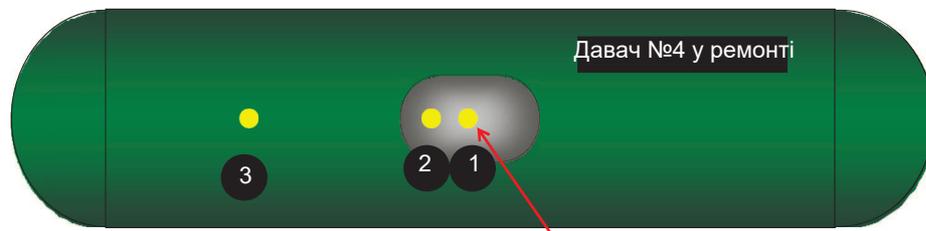
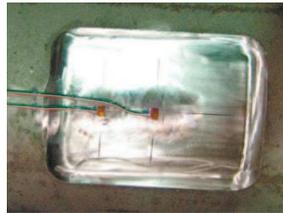


**ПРИМІТКА:** Виконуйте всю обробку на 180 градусів від поздовжнього ШКЗ.

Деталі обробки

(оброблювана ділянка довжиною 8 дюймів і шириною 6 дюймів)

**Зображення 4 – Схематична діаграма, що показує подробиці проб корозії труб (зразок з 75% корозії, що використовується у всіх звітах щодо тестувань)**

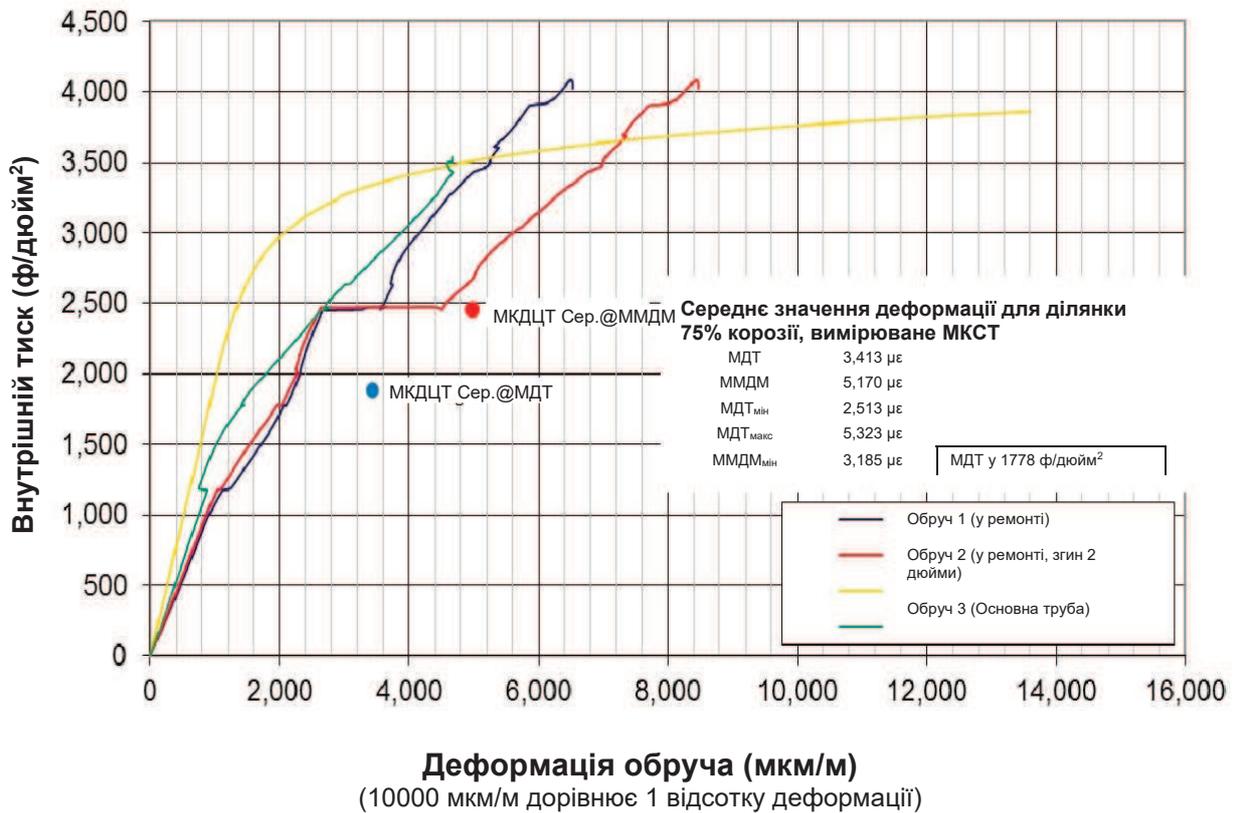


Давач # 4, розташований поверх композиту, над Давачем # 1

**Зображення 5 – Деталі на тензорезисторах, встановлені на випробовуваних зразках**

### Деформація обруча проти тиску для PermaWrap

Випробування на розрив 12,75-дюймової труби класу X42 з 75% корозією з Давачами # 1 і # 2 у зоні ремонту на основі сталі. Тиск на відмову при 4,024 ф/дюйм<sup>2</sup> (1,63 від тиску ММДМ 2470 ф/дюйм<sup>2</sup>).



**Зображення 6 – Вимірювання деформації під час випробування на розрив 75% зразка корозії**

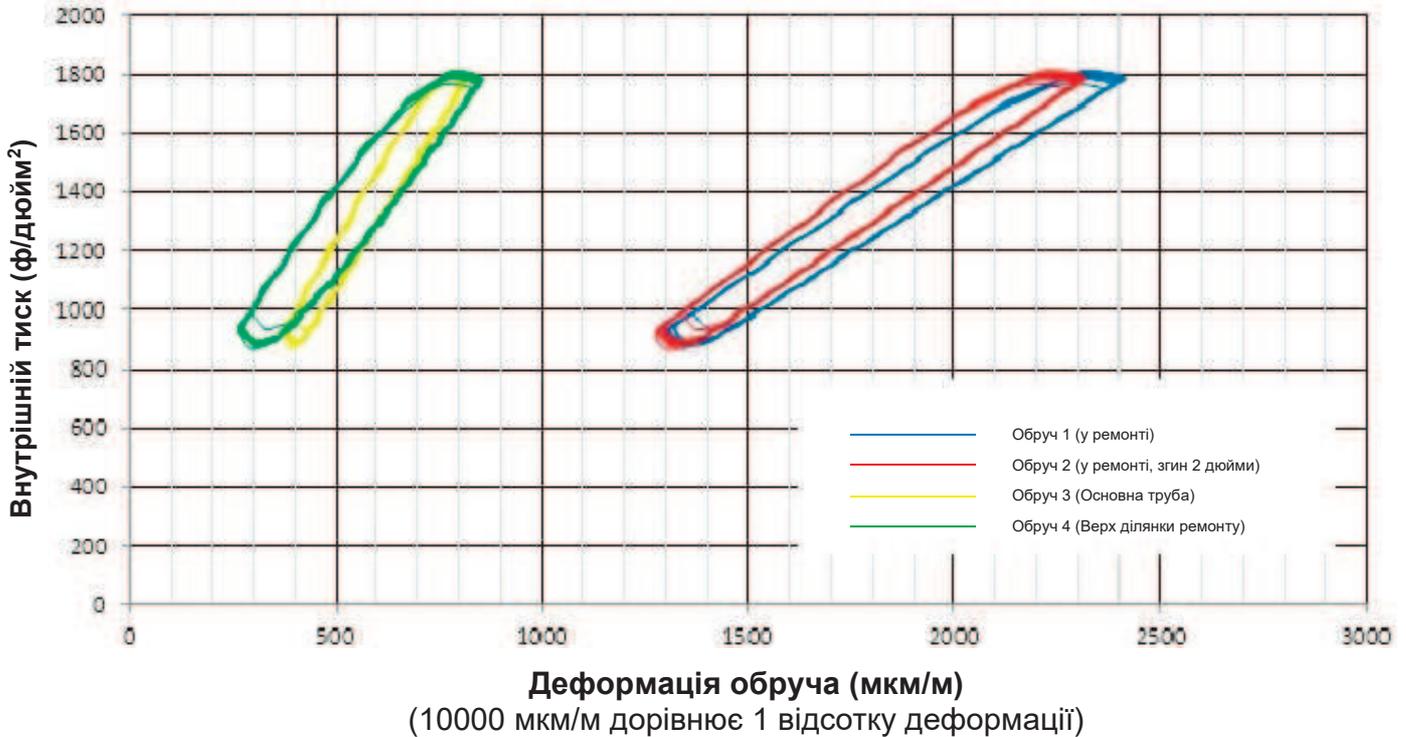


**Зображення 7 – Фотографія випробування на розрив зразка з рівнем корозії 75%**

### Деформація обруча у якості функції циклічного тиску

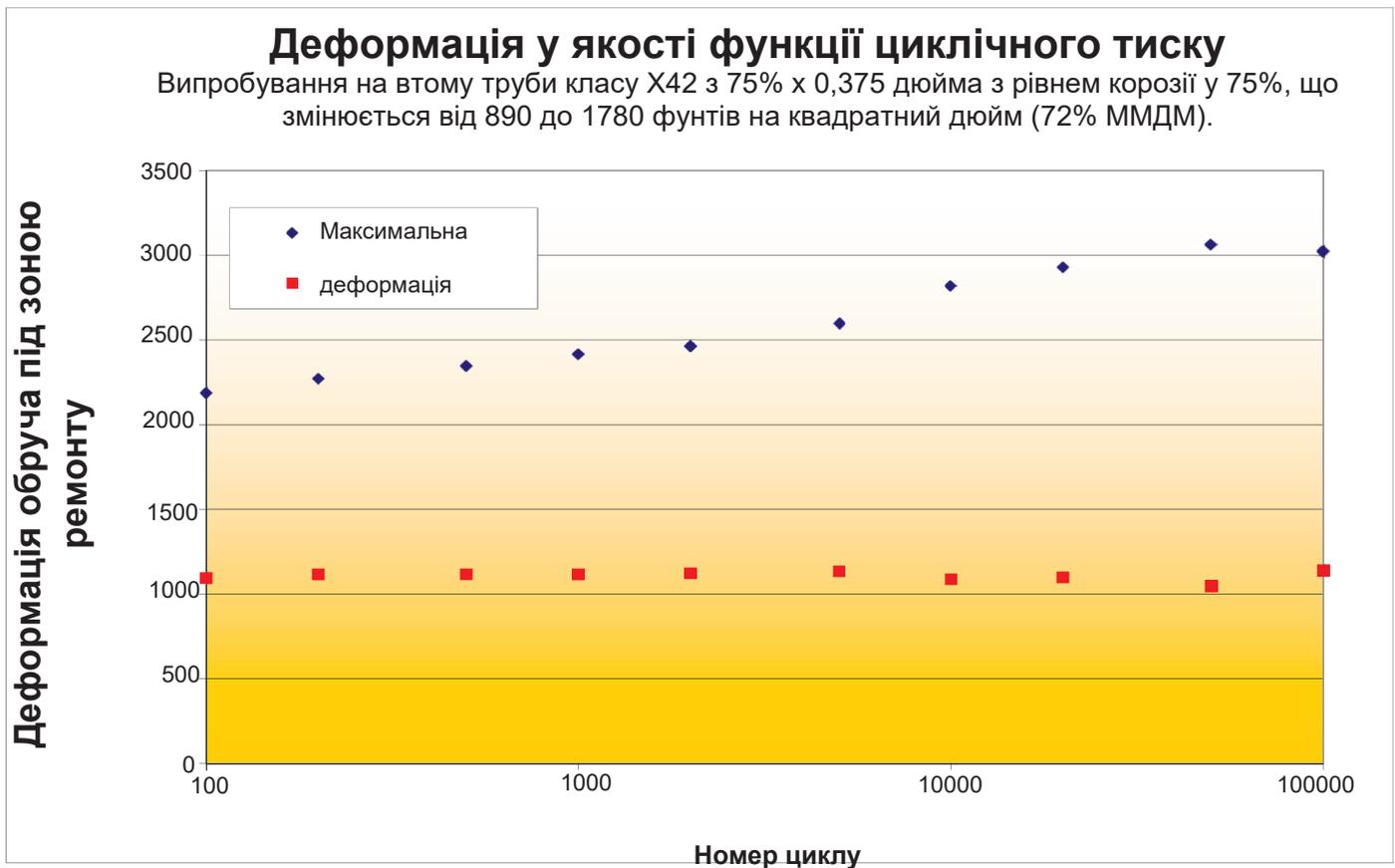
Випробування циклом тиску труби класу X42 12,75 x 0,375 дюймів з рівнем корозії 75%.

Перевірка циклом тиску на 1000 циклах між 36% та 72% ММДМ (890 – 1780 ф/дюйм<sup>2</sup>)



**Зображення 8 – Вимірювання деформації під час випробування тиском зразка з рівнем корозії 75%**

(Дані зібрано після 1000 циклів)



### Зображення 9 – Вимірювання деформації під час випробування тиском зразка з рівнем корозії 75%

(Середній діапазон деформації понад 50 000 циклів 1346 мікм/м (0,13%) зі стандартним відхиленням 6,84%)

### 3.3 Виміри міжшарової деформації

На додаток до випробувань на розрив і втомлюваність, які були проведені, проведено додаткове випробування для оцінки деформації в призначених шарах матеріалів PermaWrap™, встановлених для відновлення 75%-ї корозії в зразку труби класу X42 розміром 12,75 x 0,375 дюйма. Метою цих зусиль було декілька моментів. Спочатку визначають розподіл деформацій в різних шарах ремонту і конкретно визначають, яка частина шарів приймають більшу частину навантаження під час наддуву тиском. По-друге, для кількісної оцінки напруги в композитному матеріалі в проектних умовах з метою порівняння вимірних значень з довгостроковим розрахунковим граничним напруженням 11918 ф/дюйм<sup>2</sup> (тобто, 0,5 рази від 23836 ф/дюйм<sup>2</sup>)

Для даного тесту двоосні розетки тензорезисторів були встановлені в таких місцях:

- Центр ділянки корозії під ремонтом
- Поверх матеріалу наповнювача (під першим композитним шаром)
- 2-й шар
- 4-й шар
- 6-й шар
- За межами ремонту (на 8-му шарі)

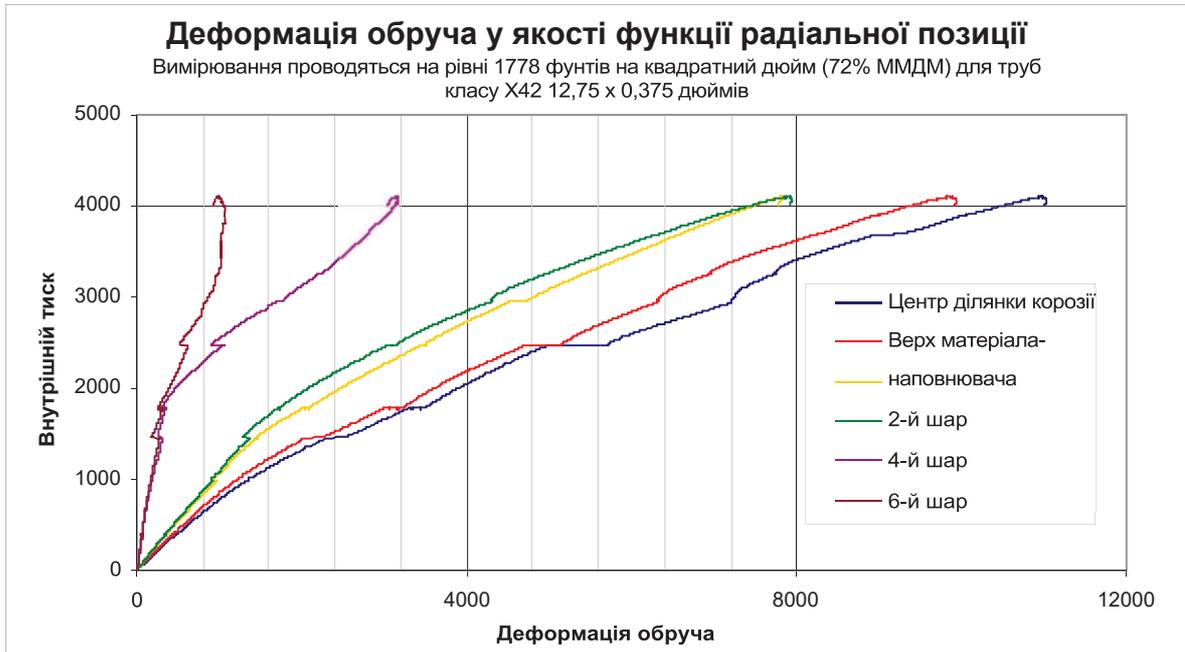
Зразок піддавали тиску 1778 фунтів на квадратний дюйм (72% ММДМ) і 2470 фунтів на кв. дюйм (100% ММДМ) і витримували протягом 5 хвилин на кожному з цих рівнів тиску. Вимірювання деформації безперервно реєструвалися до кінцевого тиску за 409 ф/дюйм<sup>2</sup> (166% ММДМ).

Наведено ряд ділянок, що показують розподіл деформацій у кожному з шарів та інших місцях, де були встановлені тензометри. На **Зобр.10** показано обтягування обруча, виміряне під час випробування на розрив як функція внутрішнього тиску. На **Зобр. 11** нанесені деформації обруча, виміряні по товщині зразка корозії труби, матеріалу наповнювача і композитного матеріалу на рівні 1778 фунтів на квадратний дюйм (72% ММДМ). Максимальна деформація відбувається в області корозії зразка труби (3,311 мкм), при цьому мінімальна деформація відбувається на 8-му шарі або зовнішній поверхні ремонту (304 мкм). Останній графік у цій серії показаний на **Зобр. 12**, показує напруги обруча в матеріалі наповнювача і складових шарах як функцію положення.

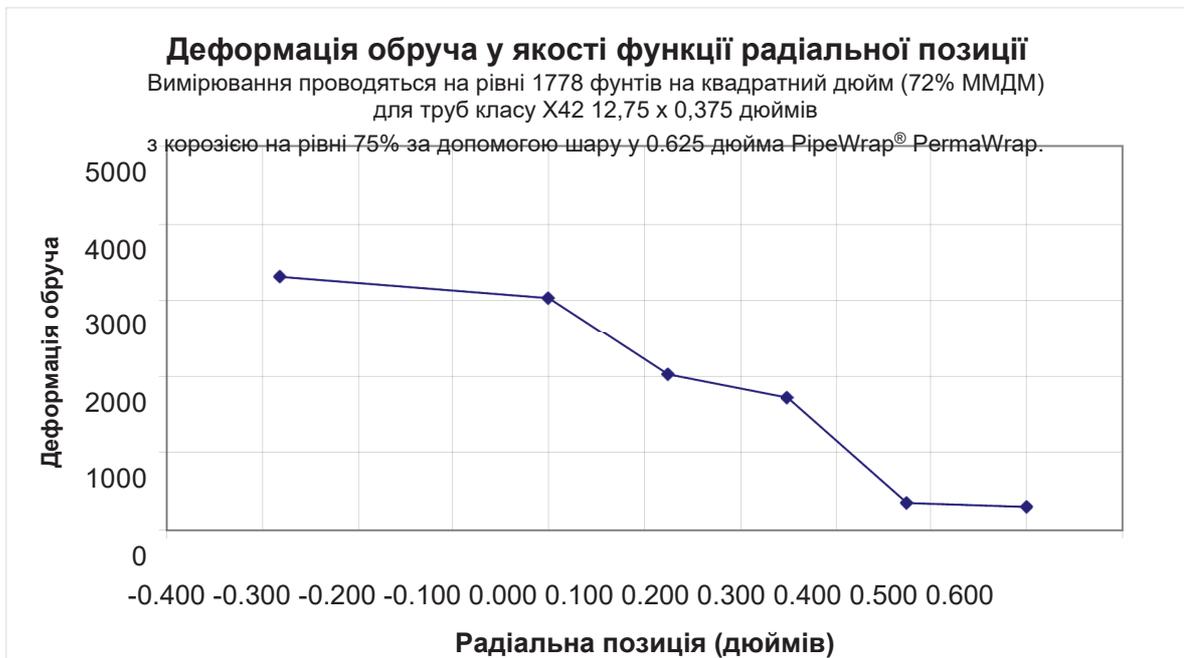
Напрямки в композитних шарах, зображених на **Зобр. 12**, обчислювалися шляхом множення наступних деформацій (показаних нижче **СИНІМ**) на комбінований модуль 5,0 млн. ф/дюйм<sup>2</sup> (див. Додаток В для конкретних деталей механічних властивостей APPW).

- Центр ділянки корозії 3 349  $\mu\epsilon$
- Верх матеріала-наповнювача: 3 034  $\mu\epsilon$
- **2-й шар: 2 032  $\mu\epsilon$**
- **4-й шар: 1 720  $\mu\epsilon$**
- **6-й шар: 349  $\mu\epsilon$**
- **Зовнішній (8-й) шар: 304  $\mu\epsilon$**

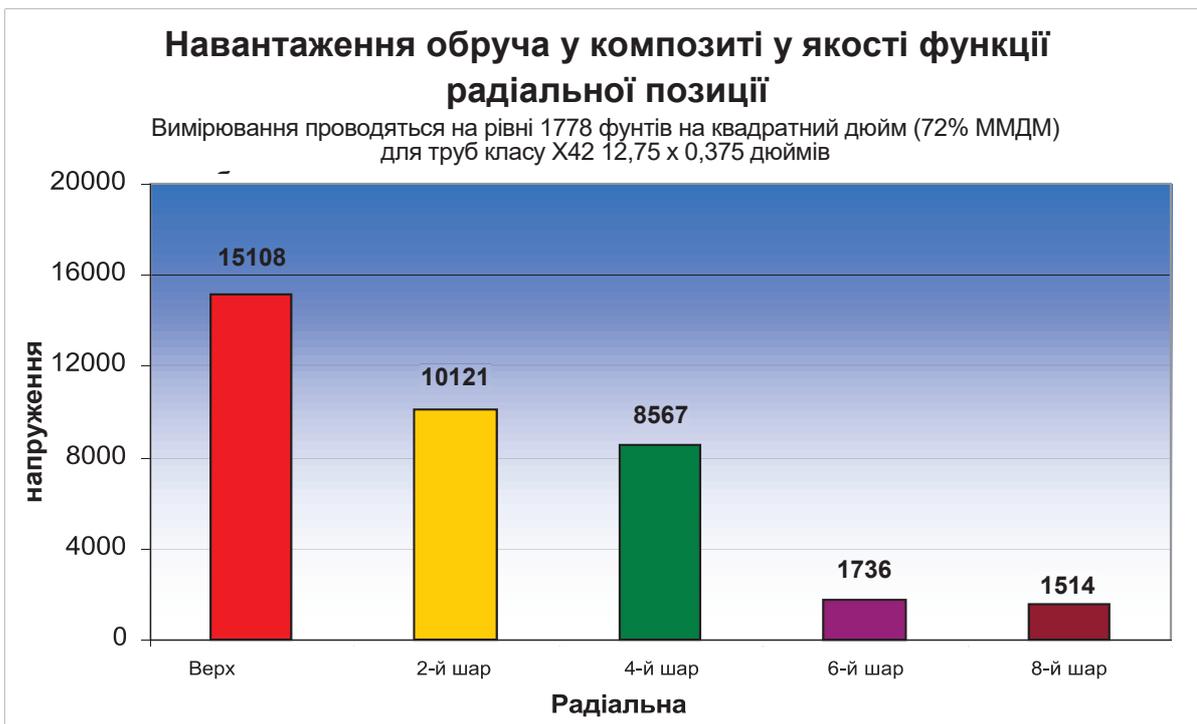
Зазначимо, що на **Зображенні 12** максимальне напруження в композитному матеріалі мало місце в шарі 2 і була розрахована на 10,121 ф/дюйм<sup>2</sup>. Кількісна оцінка цього виміряного значення є необхідною для перевірки конструкції WrapMaster® PermaWrap™ та забезпечення того, щоб фактичні напруги при ремонті були меншими, ніж встановлений ліміт напруги конструкцій. Як обговорювалося раніше, довгострокове розрахункове напруження PermaWrap™ становить 11,918 ф/дюйм<sup>2</sup> (див. **Табл. 1**, де розрахункове напруження обчислюється як доходний експлуатаційний коефіцієнт у 0,5 довгострокової міцності,  $s_{it}$ , 23836 ф/дюйм<sup>2</sup>). Виміряне напруження у 9,439 ф/дюйм<sup>2</sup> становить приблизно 80% від граничного напруження композитної конструкції у 11,918 ф/дюйм<sup>2</sup>. Проект PermaWrap™ не тільки підтверджений цими вимірами, але й ці експериментальні зусилля також демонструють, що якщо виробник композиту використовує методологію проектування у ACIM PCC-2, то напруження у ділянці фактичного ремонту буде меншим, ніж максимально допустиме розрахункове напруження для композиту матеріалу.



**Зображення 10 – Вимірювана міжшарова деформація під час випробування на розрив**



**Зображення 11 – Міжшаровий розподіл наруги за тиску 1,778 фунт/дюйм<sup>2</sup> (72% ММДМ)**  
 (дані у -0,281 дюйма з труби у стані корозії | дані у 0,000 про наповнювач | всі інші дані в/на PermaWrap™)



**Зображення 12 – Розподіл напруги в шарі PermaWrap™ за тиску 1,778 фунтів на квадратний дюйм (72% ММДМ)**  
(Кольори ниток графіка ті ж, що й для побудови графіків даних на **Зобр. 9**)

#### 4.0 КВАЛІФІКАЦІЙНІ ТЕСТИ АСІМ РСС-2

У цьому розділі доповіді наведено результати, пов'язані з кваліфікаційним тестуванням АСІМ РСС-2, зокрема, *Додаток II – тест на витримку буферів і додаток V - 1000-годинний тест для встановлення довгострокової сили впливу.*

##### 4.1 Додаток II – Випробування на витривалість обмотки

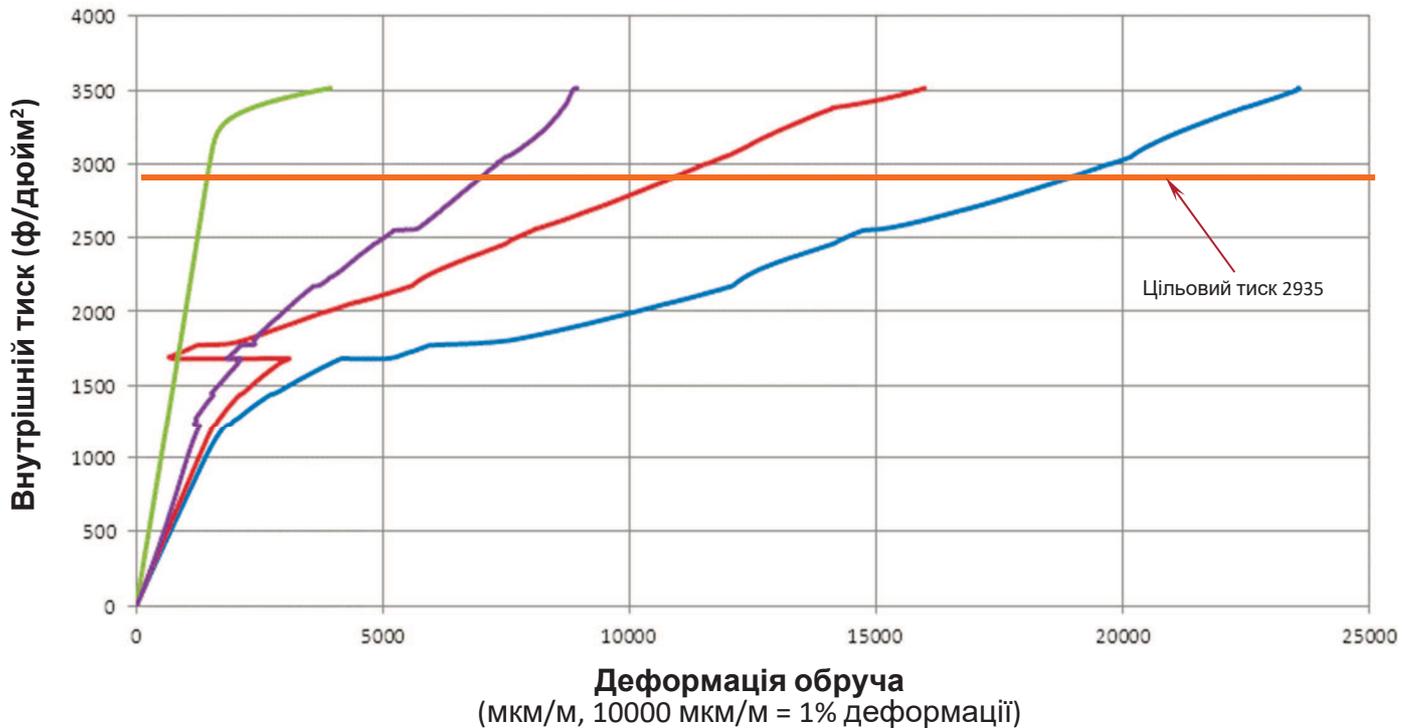
Другий тест на розрив був проведений на досліджуваному зразку, який був відповідним до описаного раніше (труба класу X42, 12,75 x 0,375 дюйма, з рівнем корозії 75%); однак, товщина ремонту була встановлена на мінімальне значення для задоволення вимог тесту, зазначених у АСІМ РСС-2. Відповідно до Статті 4.1, АСІМ РСС-2, Додаток III, *короткострокове випробування на витримку труби*, товщина композитного матеріалу обрана для підтвердження того, що ремонтна система може відновити цілісність пошкодженої ділянки труби до необхідної міцності (з використанням фактичних вимірних значень міцності). Деталі наведені в Додатку III, що позначає максимальну товщину композитного матеріалу. Для PermaWrap™, з використанням нижньої межі міцності при розтягуванні композитного матеріалу, максимальна допустима товщина становила 3 обгортання або 0,188 дюйма.

Досліджуваний зразок піддавали тиску до відмови. **Зобр. 13** зображують деформацію як функцію тиску для даного тестового зразка. Записані рівні деформацій не обов'язково мають сенс, оскільки товщина композитного ремонту становить лише одну третину від фактичної товщини ремонту, необхідної для експлуатаційних умов. Однак важливим є той факт, що тиск розриву відбувався на рівні 3,514 ф/дюйм<sup>2</sup>.

Відмова, що сталася в тестовому зразку АСІМ РСС-2, відбувалася в ремонтваному регіоні. Це можна було очікувати, оскільки товщина ремонту становила лише 0,188 дюйма. **Зобр.14** і **Зобр.15** являють собою фотографії, що показують відмову у відремонтованому регіоні.

**Тест на витримку АСІМ РСС-2**  
**WrapMaster, втрата товщини стіни на 75%**  
**3 обертання. тиск розриву = 3514 фунт/дюйм<sup>2</sup>**

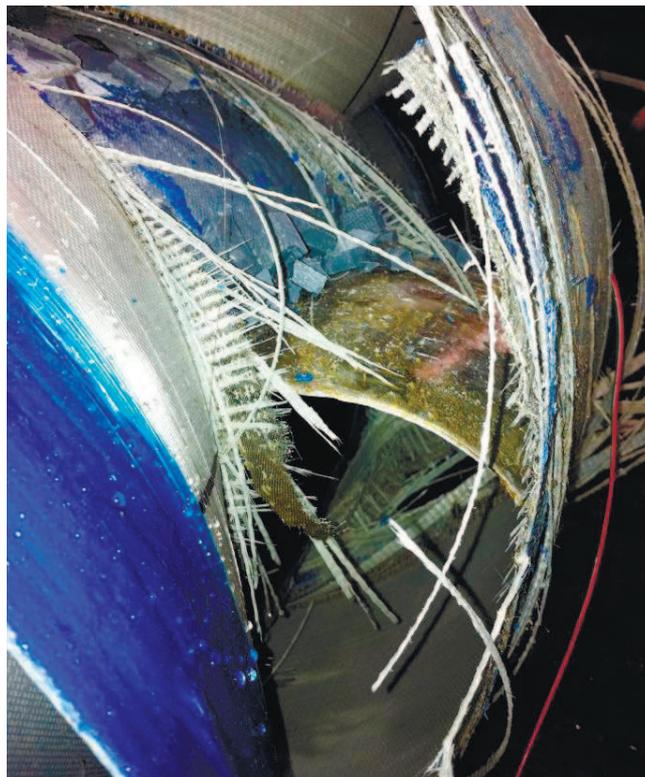
- Обруч ГС 1 ½ (у ремонті)
- Обруч ГС 2 ½ (у ремонті, інтервал 2 дюйми)
- Обруч ГС 3 ½ (Основна труба)



**Зображення 13 – Випробування на розрив зразка РСС-2 з рівнем корозії 75% (вихід з ладу на рівні тиску 3514 ф/дюйм<sup>2</sup>)**



**Зображення 14 – Вихід з ладу ремонтаного зразка WrapMaster PCC-2 (PermaWrap™ з обмотки)**



**Зображення 15 – Вихід з ладу зразка композитного матеріалу за АСІМ PCC-2  
(Система PermaWrap™ з 3 обгортаннями загальною товщиною 0,188 дюйма)**

#### 4.0 Додаток V - 1000-годинний тест для встановлення довготривалої міцності

Критично важлива частина будь-якої композитної ремонтної конструкції передбачає встановлення композитного матеріалу довготривалої міцності. Оскільки метою використання композитних матеріалів для ремонту пошкоджених трубопроводів є налагодження довготривалої роботи, дуже важливо, щоб розрахункове напруження самого композитного матеріалу трималося ближче до прийнятного мінімуму.

З цієї причини методологія проектування в АСІМ втілює три основні філософії дизайну. Найменш консервативний з цих трьох методів вимагає використання емпірично отриманого довгострокового проектного значення міцності. Як обговорювалося раніше, при використанні матеріалів для композитного ремонту, коефіцієнт безпеки щонайменше у 2,5 повинен існувати на конструкційному напруженні композиту по відношенню до короткочасної міцності на розрив і, ймовірно, більше на 4.

Додаток V статті 4.1 АСІМ РСС-2 пропонує кілька варіантів встановлення довгострокової міцності конструкції з використанням повномасштабного тестування. Окремий обраний протокол - це тестування витримки, як описано в розділі V-2.1, наведеному нижче:

Необхідно використовувати секції труби мінімальним діаметром 100 мм (4 дюйми) і мінімальною товщиною 3 мм (0,12 дюйма) і застосовувати ремонтну систему. Значення внутрішнього тиску (визначене постачальником ремонтної системи) має застосовуватися і підтримуватися протягом 1000 годин. Якщо виникне будь-яке погіршення ремонтного шару у вигляді тріщин, розшарування або протікання, ремонтна система не проходить випробування. Необхідно виконати три ідентичних випробування, а кваліфікаційний результат ремонту можливий лише за умови збереження всіх трьох випробувань. Обчислено на 95% нижче точне довгострокове навантаження

$$S_{It} = \frac{P_{test} D E_c}{2(E_c t_{min} + E_s t_s)} \quad (V-1)$$

Якщо відбувається зсув нижньої труби, на 95% нижче точне довгострокове навантаження,  $S_{It}$  (МПа), обчислюється з використанням

$$S_{It} = \frac{1}{t_{repair}} \left( \frac{P_f D}{2} - S_a t_s \right) \quad (V-2)$$

Додаткові вказівки щодо процедур тестування на витримку можна отримати з АСІМ D 1598.

Номенклатура

$S_{it}$	на 95% нижче точне довгострокове навантаження, що визначається тестуванням продуктивності відповідно до Обов'язкового Додатка II, $N/m^2$ (ф/дюйм <sup>2</sup> )
$S_a$	Вимірjana межа міцності на сертифікацію труб або подрібнювачів, $N/mm^2$ (ф/дюйм <sup>2</sup> )
$P_{test}$	Випробувальний тиск, $N/mm^2$ (ф/дюйм <sup>2</sup> )
$P_f$	Тиск на відмову непошкодженої труби, $N/mm^2$ (ф/дюйм <sup>2</sup> )
$D$	Зовнішній діаметр труби, м (дюйми)
$E_c$	Модуль розтягування композитного шару в окружному напрямку, $N/mm^2$ (ф/дюйм <sup>2</sup> )
$E_s$	Модуль розтягування для сталі (або матеріалу труб), $N/mm^2$ (ф/дюйм <sup>2</sup> )
$t_{min}$	Мінімальна товщина ремонту, м (дюйми)
$t_s$	Мінімальна товщина стінки труби, м (дюйми)
$t_{repair}$	Проектна товщина ремонту, м (дюйми)

У цій тестовій програмі три (3) непошкоджені зразки труби класу X42 12.75 x 0.375 дюймів були посилені 0,188 дюймами шару WrapMaster PermaWrap™. Зразки піддавали тиску до 3250 ф/дюйм<sup>2</sup> протягом 1000 годин без інцидентів. Отримана довгострокова міцність,  $S_{it}$ , для PermaWrap™ становила 20445 ф/дюйм<sup>2</sup>.

Випробні випробування (1 зразка) були проведені до 1000-годинного періоду витримки і не відбулося ніяких змін в результуючому тиску на розрив. Цей рівень оцінювання перевищує вимоги АСІМ РСС-2, але був гідним заняттям для підтвердження довгострокової міцності. Нижче наводяться конкретні кроки, що стосуються цієї програми тестування.

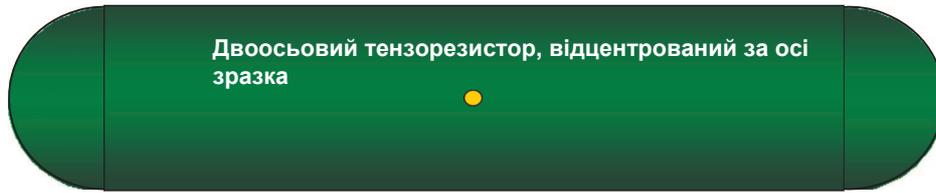
4.2.1 Деталі програми випробувань

1. Придбати трубу класу X42, 12,75 x 0,375 дюймів (достатньо, щоб виготовити чотири (4) 6-футові випробувальні зразки).
2. Виготовте чотири (4) 6-футові випробувальні зразки, встановивши на кожному зразку кінцеві кришки, як показано на **Зобр. 16**.
3. Розрахувати необхідну товщину композиту на підставі розрахунків, викладених в АСІМ РСС-2, Додаток V, розділ V-2.1.
4. У тестуванні використовуються такі конфігурації тестового зразка:
  - а. Зразок №1 - **зразок тесту на розрив**, що включає тензорезистори, встановлені на сталі під арматурою і на зовнішній поверхні композиту (див. Деталі, показані на **Зобр. 1**)

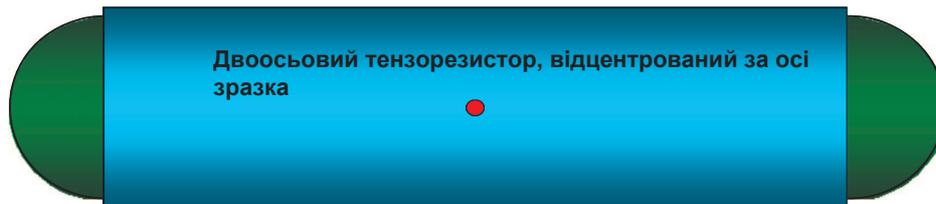
- a. Зразок №2 - 1000-годинний тестовий зразок, завантажений на  $P_1$
  - b. Зразок №3 - 1000-годинний тестовий зразок, завантажений на  $P_1$
  - c. Зразок №4 - 1000-годинний тестовий зразок, завантажений на  $P_1$
5. Застосовують розрахункову товщину композиту для тестових зразків (це 0,188 дюйма для PermaWrap™).
6. Виконайте випробування на розрив на Зразку № 1, збільшуючи при цьому внутрішній тиск у зразку до точки розриву. З вимірних тензорезисторів і даних тиску буде зібрана наступна інформація:
- a. Кінцева потужність армованого композитного випробувального зразка.
  - b. Фактична деформація в композитному матеріалі заснована на вимірних результатах тензорезистора як функція внутрішнього тиску (не значення, постульоване на передбачуваний реакції матеріалу).
  - c. Перевірка внутрішнього тиску для 1000-годинних випробувальних зразків на основі вимірних деформацій у композиційному матеріалі та порівняння з рівняннями у Додатку V PCC-2.
7. Визначте відповідний внутрішній тиск. Цей тиск слід застосовувати до трьох (3) підготовлених зразків для тестування протягом 1000 годин (Зразки №№2-4).

На **Зобр. 17** показані фотографії, зроблені під час встановлення та проведення тесту тривалістю 1000 годин.

Тестований зразок перед армуванням



Тестовий зразок після посилення



- Розташування тензорезистора (1 під армуванням)
- Розташування тензорезистора (1 зовні на композитному матеріалі)

**Зображення 16 – Схема, що показує налаштування для випробування на розрив 6-футового зразка №1**



**Зображення 17 – Фотографії з випробувань тиском протягом 1000 годин за АСІМ РСС-2**

Однією з причин того, що був проведений тест на попередню витримку, було визначення граничної пропускної здатності посиленних тестових зразків. Якщо використовуються значення міцності при розтягуванні сталі та композитних матеріалів, теоретичний тиск розриву оцінюється в 7,420 фунтів на квадратний дюйм, як показано на **Зображенні 15** аркуша розрахунків. Проте, насправді, тиск розриву був значно меншим за цю величину щонайменше на 2700 ф/дюйм<sup>2</sup>. Якби випробування на розрив не було проведено до 1000-годинного періоду тестування, цілком ймовірно, що всі три (3) тестові зразки

відмовили б, якщо б був обраний тиск порядку 7400 ф/дюйм<sup>2</sup>

Як показано на **Зображенні 18**, випробувальний тиск у 3250 фунтів на квадратний дюйм був обраний для тесту протягом 1000 годин. Використовуючи Рівняння (V-2) з Додатку V, це призводить до утворення складеного напруження у 20,445 ф/дюйм<sup>2</sup> Також у розрахунках, наведених на Зображенні 18, відзначена композитна товщина ( $t_{rem}$  в V-2) у 0,188 дюйма. Товщина, що перевищує це значення, призведе до меншої розрахункової довготривалої міцності, а зменшення товщини композиту збільшить розрахункову довготривалу міцність.

## Додаток V Тестування витримки для встановлення довгострокової міцності

ACIM PCC-2 Стаття 4.1, Додаток V, Вимірювання даних випробувань продуктивності, V-2.1 Випробування на витримку Метою цієї сторінки розрахунку є визначення необхідної кількості обгортки для ремонту випробувальної труби для встановлення довгострокової міцності композиту. Представляють інтерес рівняння V-1 і V-2, які обчислюють товщину ремонту для виробів для випробування труб. Для проходження цього випробування відремонтований зразок труби повинен витримувати тиск випробування,

### ВХІДНІ ДАНІ

### **Тестові умови Wrap Master**

Виміряна межа міцності на сертифікацію сталевих труб або станів:

$$s_s := 45000 \text{ ф/дюйм}^2$$

Виміряна гранична міцність при розтягуванні, сертифікації сталевих труб або подрібнювачів:

$$s_{UTS} := 76000 \text{ ф/дюйм}^2$$

Номінальна товщина стінки випробуваної труби:

$$t_s := 0.375 \text{ дюймів}$$

Зовнішній діаметр випробувальної труби:

$$D := 12.75 \text{ дюйм}$$

Короткочасна міцність композитного матеріалу:

$$s_c := 100000 \text{ ф/дюйм}^2$$

Два наступні значення (товщина композиту і випробувальний тиск) можуть повторюватися в міру необхідності для досягнення стану максимальної напруженості композитного матеріалу.

Товщина композиту:

$$t_{min} := 0.188 \text{ дюймів}$$

Тиск виходу з ладу непошкодженої труби:  $P_f := \frac{2s_{UTS} t_s}{D}$

$$P_{test} := 3250 \text{ ф/дюйм}^2$$

### РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕННЯ (Рівняння V-2)

Довготривале навантаження, припускаючи, що прогин у випробувальній трубі розраховується з використанням наступного рівняння (Рівняння V-2):

$$s_{It,2} := \frac{1}{t_{min}} \left( \frac{P_{test} D}{2} - s_a t_s \right)$$

$$s_{It,2} := 20445 \text{ ф/дюйм}^2$$

Пружні напруги в неармованих трубах  $S_{s,u} := \frac{P_{test} D}{2t_s}$

$$S_{s,u} := 55250 \text{ ф/дюйм}^2$$

### Результати випробувань відносно тиску на міцність на розрив

Відсоток 1000-годинного тривалого тиску відносно зареєстрованої сили розриву для 4-го випробуваного зразка. Також включено запас міцності конструкційного навантаження композитного матеріалу щодо короткочасного навантаження на розтяг.

Випробування на перевірку сили на розрив, Додаток V:

$$P_{burst} := 4692 \text{ ф/дюйм}^2$$

Коефіцієнт обслуговування для ремонтного шару (табл. 4): **Не застосовується**

$$F := 1.0$$

Коефіцієнт безпеки для випробувальних навантажень проти міцності на розрив  $CO := \frac{s_c}{f s_{It,2}}$

$$SF = 4.89$$

## Зображення 18 – Розрахунковий аркуш для тестових зразків по завершенні 1000-годинних випробувань

#### 4.2.1 Результати програми випробувань

На **Зобр. 19** показані результати попереднього випробування на розрив. Як зазначено на даному зображенні, тиск відмови для даного зразка становив 4,692 ф/дюйм<sup>2</sup> З попередніх випробувань матеріал класу X42 мав приблизний тиск розриву 4,100 ф/дюйм<sup>2</sup>; тому композитний матеріал збільшував тиск розриву приблизно на 600 фунтів на кв. дюйм. На **Зображенні 19** показана деформація як функція внутрішнього тиску (показана як **СИНЯ** крива на графіку). При приблизно 3500 фунтах на квадратний дюйм у сталевій трубі з посиленням вимірюється деформація менше 0,2%. Використовуючи це значення, внутрішній тиск у 1000-годинних зразках був встановлений на 3,250 ф/дюйм<sup>2</sup> для 1000-годинного тестування. Іншим настільки ж важливим спостереженням при розгляді нанесених даних є результати з тензорезисторів на поверхні матеріалу PermaWrap™ (показано як **ЧЕРВОНА** крива на графіку). Фотографія відмови показана на **Зобр. 20**.

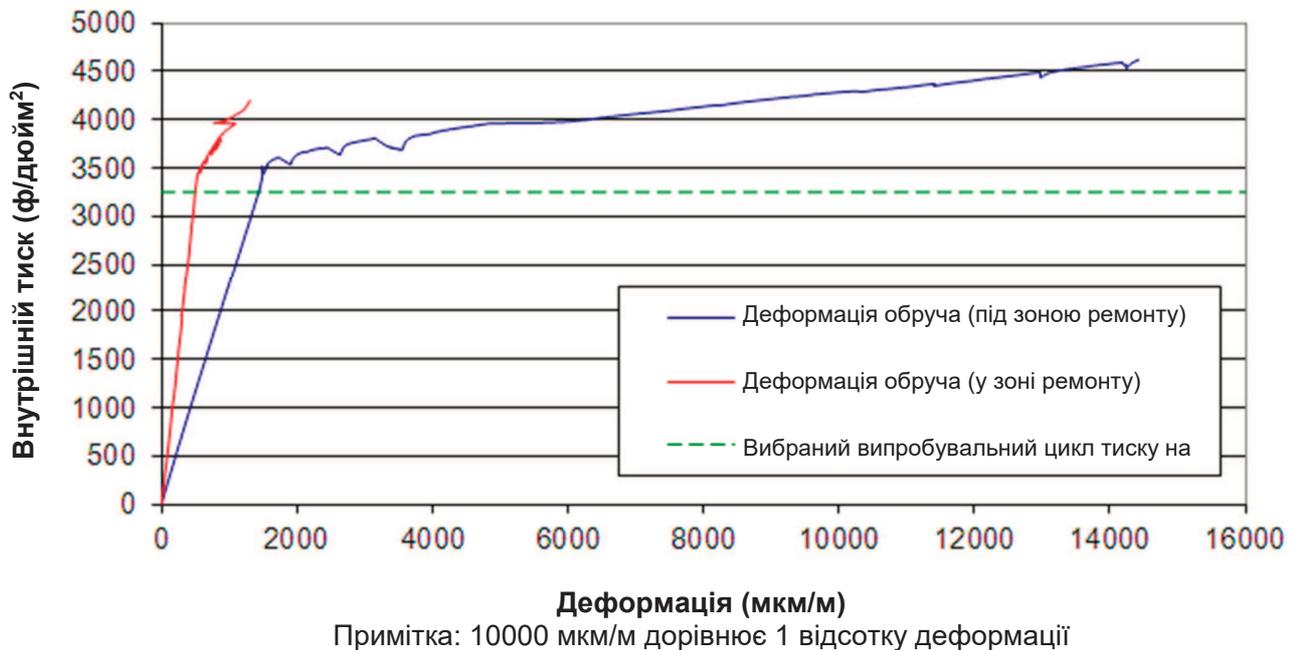
Після завершення цього випробування на розрив почалося 1000-годинне випробування. Всі три тестові зразки, які були посилені 0,188-дюймовим товстим матеріалом PermaWrap™, були поміщені в тестові камери. Внутрішній тиск підтримували за 3250 ф/дюйм<sup>2</sup> протягом 42 днів з четверга, 20 травня 2010 року до середи 30 червня 2010 року. На зразках був встановлений клапан для скидання тиску, щоб гарантувати, що внутрішні випробувальні тиски не перевищували 3,700 ф/дюйм<sup>2</sup>. Протягом 42-денного періоду середній внутрішній тиск становив 3181 ф/дюйм<sup>2</sup>, а максимальний зареєстрований тиск - 3,629 ф/дюйм<sup>2</sup>. Середня температура навколишнього середовища, зареєстрована протягом цього періоду, становила 82°F з максимальною температурою 91°F. Цілком імовірно, що в сталевих камерах діаметром 21 дюйм температура була щонайменше на 10°F вище, ніж в умовах навколишнього середовища. Середня вологість протягом цього періоду часу становили 75%.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Дані про погоду були отримані з <http://www.wunderground.com> для відповідних дат.

### Деформація у якості функції внутрішнього тиску

Випробування на розрив для Wrap Master під час тестування АСІМ РСС-2 протягом 1 000 годин з використанням композитного матеріалу товщиною 0,188 дюйма (3 обгортання) на трубі класу Х42, 12,75 x 0,375 дюйма, ( $P_{burst} = 4.692$  ф/дюйм<sup>2</sup>)



**Зображення 19 – Результати 1000-годинних випробувань на розрив для зразка за АСІМ РСС-2 (передтестові випробування)**

(Розрахунковий тиск для труб класу Х42, 12,75 x 0,375 дюйма, становить 1,780 ф/дюйм<sup>2</sup>)



**Зображення 20 – Фотографія попередніх 1000-годинних випробувань зразка на розрив (зразок №1)**

## 5.0 ДОДАТКОВА ОЦІНОЧНА РОБОТА

На додаток до розрахунків, представлених раніше, WrapMaster провела численні випробування з 2000 року для оцінки ремонтної системи PermaWrap™. У даному розділі представлено обговорення вибраних зусиль, що включають випробування на витривалість циклом тиску з посиленими композитними механічними пошкодженнями (тобто вм'ятинами з вибоями) і три випробування на розрив, отримані в рамках участі WrapMaster у 10-річному дослідженні довгострокових композитних матеріалів, спільно спонсоровані Міжнародною організацією з досліджень трубопроводів (МОДТ).

### 5.1 Проект МОДТ MATR-3-4 Рік 0 випробувань на розрив

В даний час WrapMaster бере участь у 10-річному дослідженні для оцінки довгострокової надійності PermaWrap™. Ця робота проводиться спільно з МОДТ та іншими виробниками з ремонту композитів з усього світу. Додаткову інформацію про цю програму можна знайти на сайті [www.compositerepairstudy.com](http://www.compositerepairstudy.com). У рамках цього дослідження, WrapMaster відремонтував 21 зразки труб, які мали оброблювані регіони, вражені корозією, з глибиною 40, 60 і 75% в трубах класу X42, 12,75 x 0,375 дюйма.

Тиск виходу з ладу протягом трьох (3) років випробувань на розрив подано нижче. Всі збої сталися поза ремонтваних областей, як показано на **Зобр. 21**. До списку нижче також входять значення товщини стінок композитних матеріалів, виміряних після випробувань на розрив від кілець, які були розділені.

- корозія 40% - 4,042 ф/дюйм<sup>2</sup>
- корозія 60% - 4 106 ф/дюйм<sup>2</sup>
- корозія 75% - 4 084 ф/дюйм<sup>2</sup>

### 5.2 Проект МОДТ МСЧВ-3-4 Дослідження вм'ятини

Нещодавно WrapMaster завершила тестування як учасник програми MATR-3-5 МОДТ, що оцінює використання композитних матеріалів у ремонті вм'ятин. У **Додатку С** наведено документ, який був опублікований на Міжнародній конференції трубопроводів у Калгарі 2010 року, що включає результати тестування WrapMaster у ремонті звичайних вм'ятин, вм'ятин у зварних швах та вм'ятинах у точковій зварці. Позначення листа WrapMaster наведено нижче, тому що в доповіді наведено результати для Спільної промислової програми, де декілька учасників були ідентифіковані анонімно через позначення лише літерами.