

УДК 539.371

І.Г. ЛЬВОВ

**ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ БАНДАЖІВ
ДЛЯ РЕМОНТУ ТРУБОПРОВОДІВ**

Представлена методологія оптимізації композиційних систем ремонту трубопроводів з об'ємними поверхневими дефектами. Через великий розмір задачі, що вирішується, ця методика розроблена з використанням методу експериментального проектування та техніки поверхонь відгуку. Для доведення ефективності пошкодженої ділянки до рівня непошкодженого трубопроводу в даному дослідженні формулюється та вирішується задача оптимізації, що базуються на еквівалентній міцності. Особливості, переваги та обмеження підходу обговорюються в їх застосуванні для оптимального проектування композитних систем ремонту трубопроводів.

Ключові слова: трубопровід, об'ємний дефект поверхні, композитний ремонт, оптимізація.

Представлена методологія оптимізації композиційних систем ремонту трубопроводів з об'ємними поверхневими дефектами. Из-за большого размера решаемой задачи, эта методика разработана с использованием метода экспериментального проектирования и техники поверхностей отклика. Для доведения эффективности поврежденного участка до уровня неповрежденного трубопровода в данном исследовании формулируется и решается задача оптимизации, основанная на эквивалентной прочности. Особенности, преимущества и ограничения подхода обсуждаются в их применении для оптимального проектирования композитных систем ремонта трубопроводов.

Ключевые слова: трубопровод, объемный дефект поверхности, композитный ремонт, оптимизация.

Optimization methodology for composite repair systems of transmission pipelines with volumetric surface defects is presented. The inner diameter of the bandage is taken equal to the outer diameter of the pipeline and varying parameters are the thickness and length of the bandage. Due to large dimension of the numerical tasks to be solved, this methodology is developed employing the method of experimental design and response surface technique. To bring an efficiency of damaged section up to the level of undamaged pipeline, an optimization problem based on equivalent resistant (equiresistant) design is formulated and solved in the present study. Experimental design is generated by the minimal square distance Latin Hypercube sampling method, while the optimization problem was solved using random search method. To perform analysis of the stress state of the pipeline-bandage system the finite element method implemented in software ANSYS is used. Objective function values were obtained for every sample number and the objective function was approximated with second order polynomial. Obtained results showed that bandage length parameter did not have significant effect on the stress intensity values. Features, advantages and limitations of this approach are discussed in its applicability for the optimal design of composite repair systems of transmission pipelines.

Keywords: pipe, volumetric surface defect, composite repair, optimisation.

Вступ. Трубопроводи мають виключне значення для ефективного функціонування галузі, що забезпечує європейські ринки енергетичними ресурсами: сирою нафтою, природним газом та рідкими нафтопродуктами. З цієї причини дуже важливим є забезпечення їх безперервної та безвідмовної роботи. На жаль, об'ємні дефекти поверхні, що виникають внаслідок корозійних або ерозійно-корозійних процесів, значно зменшують міцність трубопроводу. Проте, застосування композитних матеріалів в сучасних системах ремонту пошкоджених трубопроводів дає можливість зробити ремонт більш ефективним і не вимагає припинення експлуатації трубопроводу.

При проектуванні ефективного ремонту трубопроводів з об'ємними поверхневими дефектами в основному розглядаються два параметри композиційних ремонтних систем: товщина та ширина композиційного бандажу. Ці значення можна визначити, використовуючи наступні стандарти [1, 2]. Застосування цих стандартів для проектування композитних систем ремонту пошкоджених трубопроводів продемонстровано у роботах [3, 4]. Крім того, товщину композитного бандажу можна було б оцінити, використовуючи результати параметричних досліджень, проведених для різних діаметрів труб [5], розмірів дефектів [6] та внутрішніх тисків [7]. Оскільки ширина бандажу має незначний вплив на напружений стан у пошкодженій

ділянці, вона в основному оцінюється за розробленими стандартами [1, 2].

Слід зазначити, що тільки дослідження спільного впливу обох геометричних параметрів композиційного бандажу на властивості міцності ремонтної системи може забезпечити оптимальне рішення. З цієї причини розроблено оптимізаційну методологію, засновану на плануванні експериментів та технології поверхонь відгуку для оптимального проектування композитних систем ремонту трубопроводів. У даному дослідженні формулюється та вирішується задача оптимізації, що базуються на еквівалентній міцності відремонтованої ділянки до непошкодженої.

Методологія оптимізації. Через великий розмір чисельних задач, які потрібно вирішити, розроблена методологія оптимізації що базується на методі експериментального проектування [8] та методі поверхонь відгуку [9]. Ця методологія являє собою сукупність математичних і статистичних методів, корисних для моделювання та аналізу проблем, в яких на відгук впливає кілька змінних, а метою є оптимізація цього відгуку.

Процедура оптимізації, заснована на експериментальному проектуванні є не лише ефективним інструментом для оптимального проектування різних систем та процесів, що потребують чисельно-витратних роз-

рахунків, але також легко об'єднує етапи моделювання та оптимізації та вимагає менше втручання аналітика у порівнянні з іншими підходами. Крім того, цей підхід є загальним в тому сенсі, що дозволяє оптимізувати будь-які системи або процеси в довільних умовах щодо будь-якої цільової функції (наприклад, продуктивність, довговічність, цілісність, надійність, вар-

тість) з урахуванням всіх практичних вимог [10-12]. Інженерний підхід до оптимізації, що базується на технології експериментального проектування та поверхні відгуку, представлений на рис. 1. Необхідно зазначити, що на кожному з цих етапів можна вирішити проблему різними методами.

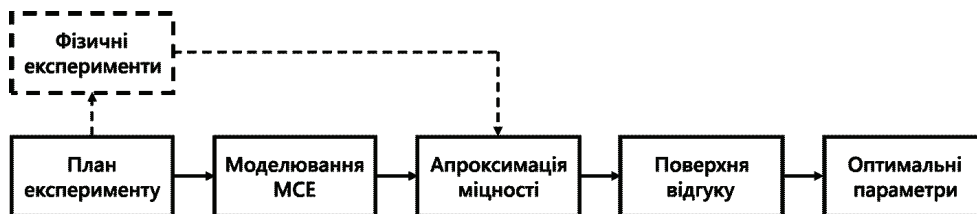


Рисунок 1 – Інженерний підхід до оптимізації

План експерименту. План експериментів може бути отриманий різними методами [8]. Після визначення плану експерименту, в цих точках проводяться чисельні розрахунки та/або фізичні експерименти. Добре відомо, що якщо для глобальної апроксимації планується використати функції поліномів другого порядку, то найбільш підходящим є D-оптимальний план експерименту, а якщо задача оптимізації містить дискретні та безперервні змінні параметри, то слід вибрати план експерименту D-Оптимальний комбінований латинський гіперкуб [13]. Мінімальна кількість запланованих експериментів у задачі оптимізації визначається в такому випадку як $n = 2L$, де $L = (k + 1)(k + 2)/2$ та k – це кількість параметрів конструкції.

Методика поверхонь відгуку. Для численних та/або фізичних експериментів, проведених в точках розробленого плану експериментів, можна застосовувати різну методику апроксимації. Існують поліноміальна методика, нейронні мережі, радіальні базисні функції, сплайн, раціональні функції, тощо [9]. Апроксимації можна отримати, використовуючи звичайну незвішену оцінку методом найменших квадратів з усуненням деяких точок і описати поліномами другого порядку:

$$\bar{F}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \sum_{j=i}^K \beta_{ij} x_i x_j. \quad (1)$$

Похибка апроксимації розраховується за допомогою наступних виразів

$$\sigma_{err} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F(x^i) - \bar{F}(x^i))^2}{N}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{err}^0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F(x^i) - \bar{F}(x^i))^2}{N - L}}, \quad (3)$$

де σ_{err} є квадратичною похибкою, σ_{err}^0 є стандартним відхиленням $F(x^i)$ і $\bar{F}(x^i)$ – значення оригінальних та апроксимованих функцій у точці вибірки i x плану експерименту, а N – число точок що використовуються для наближення. Відносна похибка визначається

відносно діапазону апроксимуючої функції:

$$\sigma_r = \frac{100\sigma}{A_F}, \quad (4)$$

$$\text{де } A_F = \max_{i=1,2,\dots,N} F(x_i) - \min_{i=1,2,\dots,N} F(x_i).$$

Нелінійна оптимізація. Обмежену нелінійну задачу оптимізації можна записати у такому вигляді

$$\min F(x); \quad H_i(x) \geq 0; \quad G_j(x) = 0, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J,$$

де I та J – число обмежень нерівності та рівності. Ця проблема замінюється проблемою необмеженої мінімізації, де обмеження беруться до уваги за допомогою штрафних функцій. Нова версія методу випадкового пошуку [14] використовується для вирішення сформульованих задач оптимізації.

Скінчено-елементне моделювання. Оптимальний дизайн композитних систем ремонту продемонстровано на корозійній ділянці газопроводу з зовнішнім діаметром 220 мм, товщиною стінки 6 мм та довжиною 953 мм, закриті з обох сторін кришкою. Ремонтвана труба вироблена зі сталі 20 з механічними властивостями, що наведено в табл. 1. Об'ємний дефект поверхні розташований на зовнішній поверхні труби (рис. 2) і має наступні розміри: 102 × 130 × 3,3 мм. Труба з дефектом відремонтована, так щоб підвищити ефективність пошкодженої ділянки до рівня не пошкодженої труби без будь-яких пластичних деформацій. Для цього дефект заповнюється наповнювачем та покривається композитним бандажем з механічними властивостями матеріалів, наведеними у табл. 2 та 3 відповідно. Нарешті, відремонтована секція труби піддається внутрішньому тиску 3,34 МПа.

Для визначення поля напруги в досліджуваній секції труби під дією внутрішнього тиску лінійний статичний аналіз методом скінченних елементів застосовується в точках розробленого плану експериментів. Скінчено-елементні 3D моделі відремонтованої труби (рис. 3) побудовано за допомогою коду ANSYS [15], де всі компоненти композитної системи ремонту моделюються тривимірними 8-вузловими скінченними елементами SOLID185.

Таблиця 1 – Механічні властивості сталі 20

Межа міцності σ_b , МПа		Межа текучості σ_{02} , МПа		Відносне подовження δ_5 , %		Модуль Юнга, Е, МПа	Коеф. Пуассона, ν
Кільцевий напрям	Осьовий напрям	Кільцевий напрям	Осьовий напрям	Кільцевий напрям	Осьовий напрям		
474,76	461,40	305	314	33,13	40,97	2.0×10^5	0,3

Таблиця 2 – Механічні властивості наповнювача

Модуль Юнга Е, МПа	Межа міцності σ_b , МПа	Щільність ρ , г/см ³	Коеф. Пуассона ν
4500	80	1.2	0,5

Таблиця 3. Механічні властивості композитного бандажу

Модуль Юнга Е, МПа		Межа міцності σ_b , МПа		Коеф. Пуассона ν
Кільцевий напрям	Осьовий напрям	Кільцевий напрям	Осьовий напрям	
48465.21	3000	678.51	75	0.17

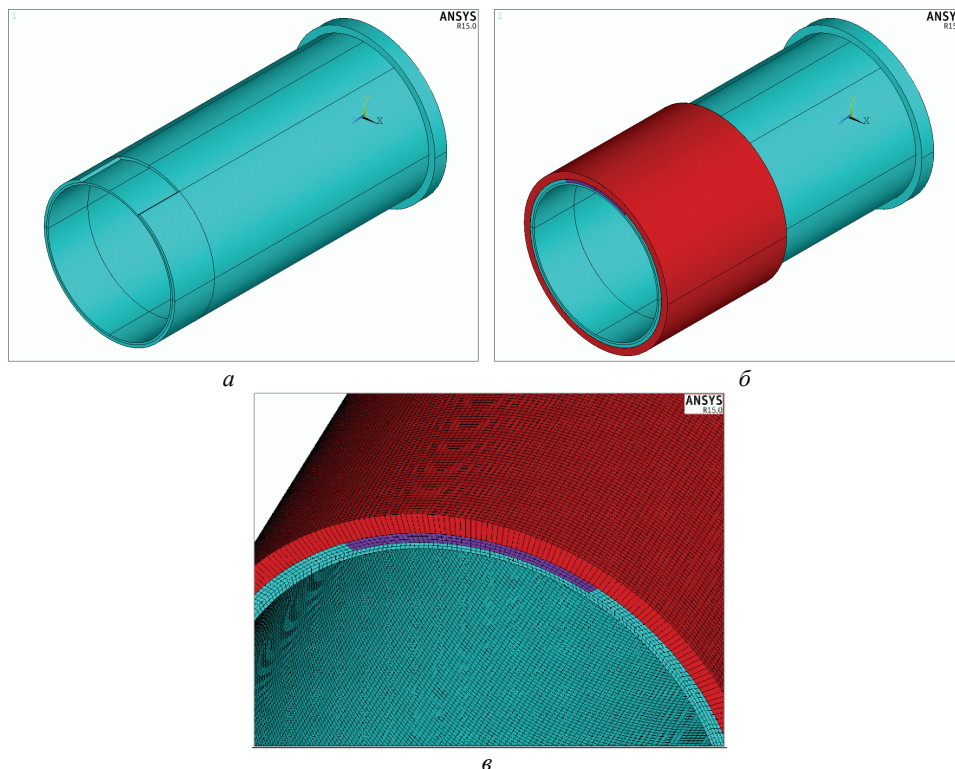


Рисунок 2 – Модель труби: а – без бандажу; б – з бандажем; в – скінчено-елемента модель

Через велику різницю між модулями Юнга матеріалів різних компонентів, проведено дослідження збіжності скінчено-елементної сітки. З цього дослідження (рис. 3) та через кратність ширини бандажу було обрано розмір ребра елемента у 2 мм.

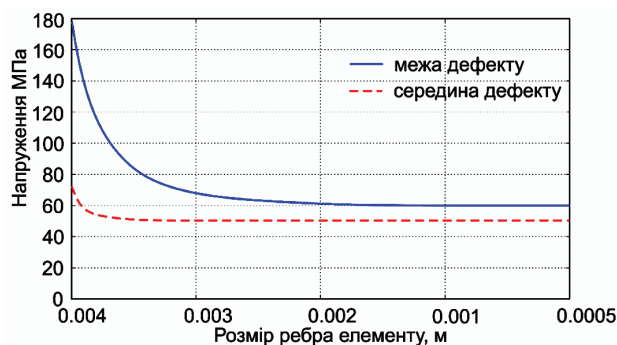


Рисунок 3 – Збіжність СЕ сітки

Це значення дає можливість проводити лінійний статичний аналіз з регулярною скінчено елементною сіткою для всіх точок з плану експериментів.

Формулювання проблем оптимізації. Сформульовано задачу оптимізації, що базується на рівномірності для композитних систем ремонту трубопроводів. Вона має два конструктивні параметри: товщина h і ширина l накладених композитних бандажів. Крім того, один проектний параметр, ширина, розглядається як безперервний, в той час як інший, товщина, як дискретне значення за рахунок того що композит накладається шарами. Ці проектні параметри розшукуються в таких межах:

$$\begin{aligned} 15 &\leq k \leq 43; \\ 140 &\leq l \leq 400, \end{aligned} \quad (4)$$

де $k = h/t$ – кількість шарів у композитному бандажі та

$t = 0,39$ мм товщина окремого шару. Цільова функція визначається таким способом, щоб забезпечити однакову міцність відремонтованої частини та непошкодженої ділянки трубопроводу:

$$Q = \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_0}{\sigma_0} \right)^2 \Rightarrow \min, \quad (5)$$

де σ_{\max} є максимальним напруженням в зоні об'ємного дефекту поверхні та $\sigma_0 = 61,2$ МПа – це напруження непошкодженої ділянки при прикладеному внутрішньому тиску в 3,34 МПа.

Рішення проблем оптимізації. На початку процесу оптимізації поле напруження розраховується в 20 точках плану експерименту, створеного методом вибірки латинського гіперкуба [16], оскільки сформульовані задачі оптимізації містять дискретні та безперервні проектні змінні. Мінімальна кількість точок вибірки для полінома другого порядку з n змінними (параметрами проектування) є $(n + 1)(n + 2)/2$. Загальноприйнята практика – використовувати більше, ніж подвоєну кількість точок вибірки. Оскільки скінченоеlementні розрахунки при лінійному статичному аналізі не потребують багато часу, було використано 20 точок вибірки. Відповідний план експериментів представлений на рис. 4.

Використовуючи результати скінчено-елементного аналізу та звичайного незваженого методу най-

менших квадратів [9], поліноми другого порядку були отримані зі стандартним відхиленням $\sigma_{err}^0 = 0.009121$ для апроксимації цільової функції, описаної у рівнянні (6):

$$Q = 0,755 + 0,855 \cdot 10^{-3} k^2 + 0,504 \cdot 10^{-9} l^2 + 0,572 \cdot 10^{-5} kl - 0,0513k - 0,186 \cdot 10^{-3}l. \quad (6)$$

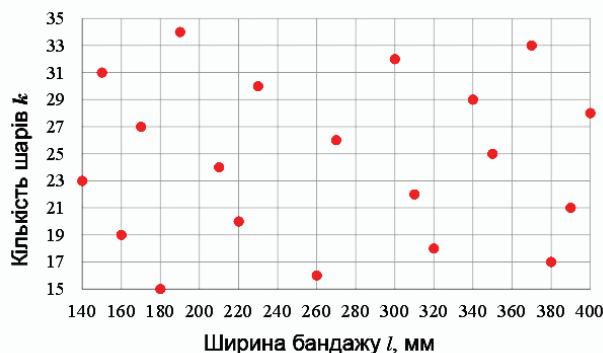


Рисунок 4 – Точки вибірки у полі всіх можливих значень у заданому інтервалі

Відповідна поверхня відгуку представлена на рис. 6, а, де видно, що ширина пов'язки не має суттєвого впливу на цільову функцію, особливо в точках, близьких до оптимального рішення.

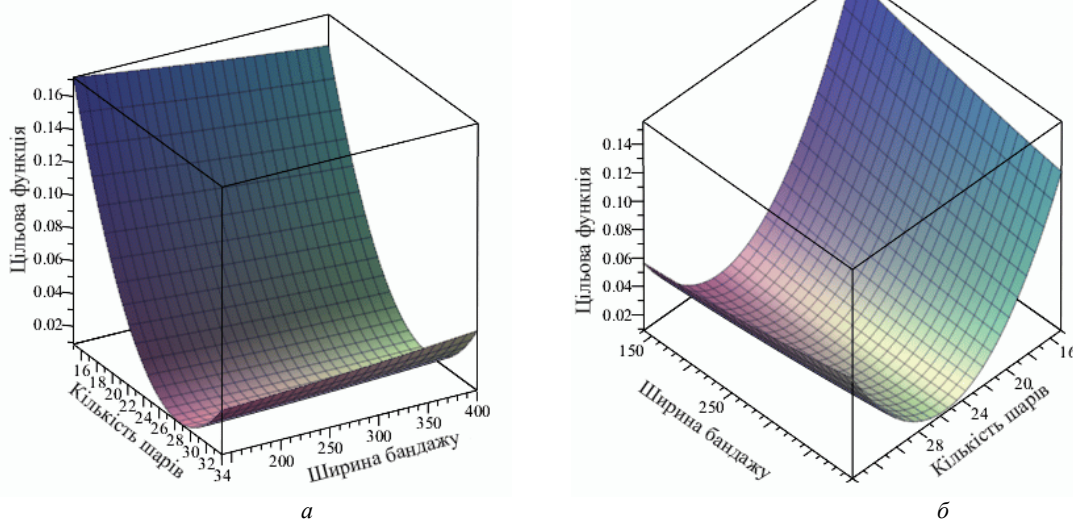


Рисунок 5 – Графік цільової функції для аналізу труби під дією внутрішнього тиску: а – 3,34 МПа, б – 8,99 МПа

Далі проблема оптимізації вирішується методом випадкового пошуку [17] за допомогою програмного забезпечення для оптимізації EDAOpt [18] з метою мінімізації цільової функції, представленої у рівнянні (6). Застосовуваний алгоритм - поліпшений багатостадійний алгоритм з генерацією нових початкових точок шляхом обміну випадково вибраними координатами точок з раніше знайденим найкращим рішенням. Алгоритм оптимізації EDAOpt використовує тільки обчислення вибірки типу латинського гіперкуба з послідовним зменшенням розміру області пошуку (неподалік області можливого рішення). Насправді область по-

шуку переміщується після кожного оновлення цільової функції, а її розмір зменшується після невдалого розрахунку даної кількості точок вибірки. Значення для дискретних змінних отримують як найближче дискретне значення зразка Латинського гіперкуба. Слід зазначити, що в цьому алгоритмі немає суттєвих відмінностей між неперервними та дискретними змінними. Практично можна припустити, що безперервна змінна – це дискретна змінна з великою кількістю кроків дискретизації. На практиці використовується 1001 крок дискретизації для безперервних змінних. Проте процес оптимізації організований таким чином,

що навіть для безперервних змінних початкове число кроків дискретизації встановлюється рівним 3 або 5, відбувається пошук оптимального значення, а потім збільшується кількість кроків. Більш детальна інформація про вибірку точок плану методом Латинського гіперкуба та метод випадкового пошуку, використаний у даному дослідженні, наведено в [18]. У роботі [14] наведено короткий огляд глобальних методів оптимізації та порівняння відповідного програмного забезпечення шляхом вирішення заданих задач оптимізації.

Результати оптимізації, товщини та ширини бандажу наведені в табл. 4. Оскільки замість оригінальних функцій використовуються поверхні відгуку, оптимальні результати перевірено за допомогою рішення на скінчено елементній моделі в ANSYS. Спостерігається хороший збіг результатів між скінчено елементним аналізом та розробленими апроксимаціями. Напружений стан для оптимального дизайну системи композитного ремонту досліджуваної секції труби представлено на рис. 6.

Таблиця 4 – Оптимальні параметри ремонтного бандажу

Ширина бандажу, l, мм	Кількість шарів, k	Об'єм бандажу, м ³	Напруження в зоні дефекту (апроксимація), МПа	Напруження в зоні дефекту (MCE), МПа	Напруження в недоформованій зоні труби, МПа
260	28	2060	61.2	61.1	61.2

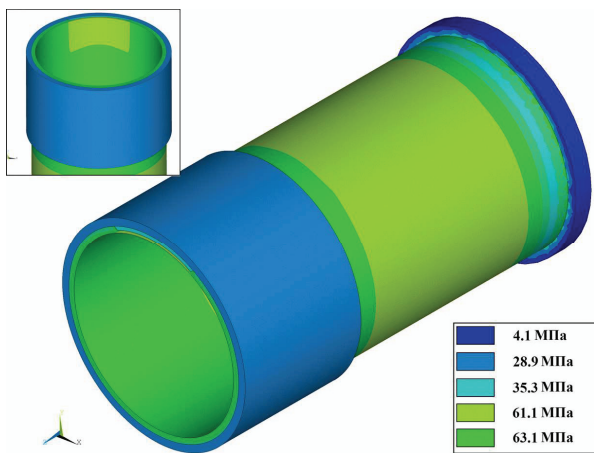


Рисунок 6 – Інтенсивність напружень по фон Мізеса в ремонтній трубі з дефектом під дією внутрішнього тиску в 3,34 МПа.

Оскільки досліджується лише лінійна поведінка конструкції, оптимальні рішення, отримані для прикладеного внутрішнього тиску (3,34 МПа), можуть бути використані також для інших значень тиску. Найвищий рівень тиску в цьому випадку обмежений виникаючими напруженнями у непошкодженій трубі, яка повинна бути меншою, ніж межа пластичності матеріалу труби (табл. 1). Іншими словами, отримані оптимальні рішення залишаються в силі для рівнів внутрішнього тиску менше 16,64 МПа.

Висновки. Розглянуто та вирішено задачу оптимізації параметрів ремонтного бандажу, на основі рівномірності, для забезпечення робочої здатності пошкодженої зони трубопроводу на рівні з непошкодженою. Розроблена методологія оптимізації що базується на методі експериментального проектування та методі поверхонь відгуку. План експерименту визначено за допомогою D-оптимального латинського гіперкубу.

Для визначення значень цільової функції застосовувались результати скінчено-елементного аналізу відремонтованої труби під дією внутрішнього тиску.

Використовуючи незважений метод найменших квадратів апроксимовано цільову функцію та створено поверхню відгуку. За допомогою алгоритму оптимізації EDAOpt визначено оптимальні значення ширини та товщини композитного бандажу.

Список літератури:

1. ISO 24817:2015: Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries – Composite Repairs for Pipeworks – Qualification and Design, Installation, Testing and Inspection.
2. ASME PCC-2-2015: Repair of Pressure Equipment and Piping.
3. Chan P.H., Tshai K.Y., Johnson M., Li S. The flexural properties of composite repaired pipeline: Numerical simulation and experimental validation // *Composite Structures*. – № 133, 312 (2015).
4. Chris A., Souza J., Whalen C. Materials and Fabrication // *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference*. Anaheim, California (2014).
5. Orlov V. Computer simulation of optimal thickness of polyurea coating using for trenchless renovation of potable water pipes // *Procedia Engineering*. – № 165, 1168 (2016).
6. Kovalska A., Eiduks M. Investigation of composite repair of pipelines with volumetric surface defect // *Proceedings of the 9th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering*. Tallinn, Estonia. – 360 (2014).
7. Chris A., Cercone L., Lockwood J. Development of a carbon-Fiber composite repair system for offshore risers // *Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril, Portugal (2008).
8. Wu C.F.J. Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimisation / C.F.J. Wu, M. Hamada. – John Wiley & Sons Inc., New York (2000).
9. Myers R.H. Response Surface Methodology: Process and Product Optimisation Using Designed Experiments / R.H. Myers, D.C. Montgomery. – John Wiley & Sons Inc., New York (2002).
10. Barkanov E.N., Rikards R.B., Chate A.K. Optimisation of Sandwich Structures with Damping Properties // *Mechanics of Composite Materials*. – № 1, 485 (1993).
11. Barkanov E., Gluhik S., Kovalov A. Optimal Design of the Active Twist for Helicopter Rotor Blades with C-Spar // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – № 15(3-4), 325 (2008).

Bibliography (transliterated):

1. ISO 24817:2015: Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries – Composite Repairs for Pipeworks – Qualification and Design, Installation, Testing and Inspection.
2. ASME PCC-2-2015: Repair of Pressure Equipment and Piping.
3. Chan P.H., Tshai K.Y., Johnson M., Li S., The flexural properties of composite repaired pipeline: Numerical simulation and experimental validation. *Composite Structures*, 133, 312 (2015).
4. Chris A., Souza J., Whalen C., Materials and Fabrication. Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference. Anaheim, California (2014).
5. Orlov V., Computer simulation of optimal thickness of polyurea coating using for trenchless renovation of potable water pipes. *Procedia Engineering*, 165, 1168 (2016).
6. Kovalska A., Eiduks M., Investigation of composite repair of pipelines with volumetric surface defect. Proceedings of the 9th International DAAAM Baltic Conference Industrial En-

gineering. Tallinn, Estonia, 360 (2014).

7. Chris A., Cercone L., Lockwood J., Development of a carbon-Fiber composite repair system for offshore risers. Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Estoril, Portugal (2008).
8. Wu C.F.J., Hamada M., Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimisation. John Wiley & Sons Inc., New York (2000).
9. Myers R.H., Montgomery D.C., Response Surface Methodology: Process and Product Optimisation Using Designed Experiments. John Wiley & Sons Inc., New York (2002).
10. Barkanov E.N., Rikards R.B., Chate A.K., Optimisation of Sandwich Structures with Damping Properties. *Mechanics of Composite Materials*, 1, 485 (1993).
11. Barkanov E., Gluhik S., Kovalov A., Optimal Design of the Active Twist for Helicopter Rotor Blades with C-Spar. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 15(3-4), 325 (2008).

Надійшла (received) 05.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

- Оптимальне проектування композитних бандажів для ремонту трубопроводів / І.Г. Львов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 40 (1262). – С. 37-42. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9130.
- Оптимальное проектирование композитных бандажей для ремонта трубопроводов / И.Г. Львов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 40 (1262). – С. 37-42. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9130.
- Optimal design of composite repair systems of transmission pipelines / I.G. Lvov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 40 (1262). – P. 37-42. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

- Львов Иван Геннадійович** – доктор філософії; асистент; кафедра Теоретичної механіки; НТУ «ХПІ», тел.: (095) 473-53-63; e-mail: ivan.lvov@ukr.net.
- Львов Иван Геннадьевич** – доктор філософії; асистент; кафедра Теоретической механики; НТУ «ХПІ»; тел.: (095) 473-53-63; e-mail: ivan.lvov@ukr.net.
- Lvov Gennadii Ivanovych** – PhD; Assistant; Theoretical mechanics Department; NTU "KhPI", tel.: (095) 473-53-63; e-mail: ivan.lvov@ukr.net.