

РОМАН ОНАЦЬКИЙ, СЕРГІЙ МІСЮРА

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА МІЦНОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВМ'ЯТИНАМИ: ОГЛЯД

Дослідження спрямоване на систематизацію поточного стану розробок, аналіз розвитку методів моделювання та оцінки міцності циліндричних конструкцій з локальними дефектами у вигляді вм'ятин. Додатково обґрунтовується необхідність переходу до гібридних інтелектуальних систем для визначення залишкового ресурсу. Проведено детальний огляд наукової літератури, який охоплює теоретичні основи механіки оболонок від класичної гіпотези Кірхгофа-Лява до нелінійних теорій стійкості. Детально проаналізовано підходи до чисельного моделювання формування вм'ятин методом скінченних елементів. При цьому враховано контактну взаємодію, фізичну та геометричну нелінійність, залишкові напруження та циклічну довговічність. Також розглянуто сучасні алгоритми машинного навчання на основі нейронних мереж. Виявлено, що пряме використання класичних аналітичних рішень має складнощі, що зумовило розвиток відповідної нормативної бази у стандартах різних країн світу, таких як США, Великобританія, Норвегія та Україна. Встановлено, що багатокритеріальне чисельне моделювання гарантує високу точність відтворення стану в зоні дефекту. Проте його значна обчислювальна вага стримує використання в оперативній інженерній практиці. Визначено, що впровадження сурогатних моделей на базі машинного навчання може значно скоротити час розрахунків без помітної втрати якості. Доведено, що найбільш дієвим шляхом у сфері аналізу міцності пошкоджених оболонок є використання гібридних підходів. Інтеграція масивів даних чисельного моделювання з алгоритмами штучного інтелекту формує зручну базу для розробки цифрових двійників обладнання. Це дозволяє здійснювати перехід від реактивних до предиктивних стратегій експлуатації критичних інфраструктурних об'єктів.

Ключові слова: вм'ятина, циліндричні оболонки, посудини під тиском, трубопроводи, метод скінченних елементів, механіка руйнування, циклічна довговічність, машинне навчання, сурогатні моделі.

ROMAN ONATSKYI, SERHII MISIURA

MODELING AND STRENGTH ASSESSMENT OF DENTED CYLINDRICAL STRUCTURES: A REVIEW

The research aims to systematize the current state of developments, analyze the evolution of modeling methods, and evaluate the strength of cylindrical structures with local dent defects. It also justifies the need to transition to hybrid intelligent systems for determining the remaining structural life. A detailed review of scientific literature was conducted, covering the theoretical foundations of shell mechanics from the classical Kirchhoff-Love hypothesis to nonlinear stability theories. Approaches to numerical modeling of dent formation using the finite element method were analyzed in detail. Contact interaction, physical and geometric nonlinearity, residual stresses, and cyclic fatigue life were taken into account. Modern machine learning algorithms based on neural networks were also reviewed. It was found that the direct use of classical analytical solutions presents difficulties, which led to the development of a relevant regulatory framework in the standards of various countries, such as the USA, the UK, Norway, and Ukraine. It was established that multicriteria numerical modeling guarantees high accuracy of state reproduction in the defect zone. However, its significant computational weight hinders its use in prompt engineering practice. It was determined that implementing surrogate models based on machine learning can significantly reduce calculation time without a noticeable loss of quality. It is proven that the most effective way in the field of strength analysis of damaged shells is the use of hybrid approaches. The integration of numerical modeling data sets with artificial intelligence algorithms creates a convenient basis for developing digital twins of equipment. This makes it possible to transition from reactive to predictive exploitation strategies for critical infrastructure facilities.

Keywords: machine learning, finite element method, dents, plates, shells, dataset, strength prediction.

Вступ. Циліндричні посудини, апарати та трубопроводи, що працюють під дією внутрішнього тиску широко застосовуються, як елементи інфраструктури нафтогазової, хімічної, енергетичної та переробної галузей промисловості. Масштаб їх застосування глобальний, зокрема, за даними директиви [1], що регулює обіг обладнання під тиском на території Європейського союзу (ЄС), в ЄС експлуатуються мільйони одиниць такого обладнання. У Сполучених Штатах загальна протяжність трубопроводних мереж за даними адміністрації з безпеки трубопроводів та небезпечних матеріалів PHMSA [2], перевищує 4,2 мільйона кілометрів. В Україні лише газотранспортна система налічує понад 38 тис км трубопроводів [3] та тисячі одиниць обладнання, що працює під тиском.

В ході довготривалої експлуатації таке обладнання отримує в тому числі і механічні пошкодження, зокрема вм'ятини. Такі типи дефектів належать до найбільш поширених. За даними Європейської групи з інцидентів на газопроводах EGIG, а також ряду інших джерел [4, 5, 6], зовнішні

механічні впливи і корозія є провідною причиною відмов на магістральних газопроводах, для наземних трубопроводів та для посудин під тиском. Причому вм'ятини становлять значну частку дефектів, що виявляються під час планових оглядів.

Вм'ятина - це локальне відхилення форми циліндричної оболонки від номінальної геометрії, що виникає внаслідок контакту з зовнішнім об'єктом (наприклад інструментом обладнання, ковшем екскаватора тощо) і супроводжується пластичним незворотнім деформуванням матеріалу. На відміну від корозійних пошкоджень металу, вм'ятина не зменшує товщину стінки, однак створює зону концентрації напружень і залишкових пластичних деформацій. Змінений напружено-деформований стан (НДС), може суттєво впливати на несучу здатність та залишковий ресурс елементів конструкції [7, 8].

За характером деформування вм'ятини можна класифікувати як гладкі, що мають плавний профіль, та гострі з різкою зміною кривизни. За наявністю додаткових пошкоджень - на чисті та поєднані з канавками або тріщинами. За положенням відносно

зварних швів – на розташовані на вільному тілі труби та поблизу зварного з'єднання [7, 8, 9].

Традиційно для оцінки міцності конструкцій з вм'ятинами використовують наступні підходи. Теоретично-емпіричний, що спирається на нормативні документи [9, 10, 11, 12, 13] та спрощені формули і критерії прийнятності дефектів, однак їхня область використання обмежена типовими конфігураціями і областю застосування. Детермінований, що ґрунтується на чисельному моделюванні НДС, зазвичай з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Цей підхід дозволяє врахувати фізичну та геометричну нелінійності, ефекти від контактної взаємодії та залишкові напруження. Цей підхід може забезпечити високу точність, проте є витратним з точки зору обсягу обчислень. Так, одне повне моделювання процесу утворення вм'ятини з подальшим навантаженням внутрішнім тиском може потребувати кілька годин розрахункового часу [14]. Що обмежує сферу його застосування.

Також слід зазначити перспективний і сучасний дата-центричний підхід, що поєднує результати МСЕ з методами машинного навчання (МН) [14, 15, 16]. Ідея підходу полягає у створенні сурогатних моделей, які навчаються на базах даних МСЕ розрахунків і дозволяють прогнозувати НДС, граничний тиск або залишковий ресурс конструкції з дефектом за секунди замість годин. Такий підхід відкриває широкі перспективи для створення, зокрема, цифрових двійників обладнання [16, 17, 18] і дозволяє проводити моніторинг обладнання в реальному часі.

Метою цієї роботи є систематизація сучасного стану досліджень, аналіз розвитку методів моделювання та оцінки міцності циліндричних конструкцій з вм'ятинами. Для досягнення цієї мети було поставлено наступні завдання:

- проаналізувати теоретичний фундамент від класичних лінійних теорій оболонки до нелінійних постановок, та здійснити огляд чинної нормативної бази щодо оцінки обладнання з дефектами;
- систематизувати підходи до моделювання процесу утворення вм'ятин, що супроводжується контактною взаємодією, пружним відновленням форми та залишковими напруженнями;
- оцінити можливості та обмеження чисельного моделювання при аналізі НДС в зонах локальних недосконалостей;
- розглянути особливості застосування підходів механіки руйнування для оцінки втомної довговічності при циклічних навантаженнях;
- проаналізувати ефективність застосування дата-центричних методів та алгоритмів машинного навчання для створення швидких сурогатних моделей і цифрових двійників.

Враховуючи багатофакторність проблеми, особливу увагу приділено визначенню меж застосовності існуючих підходів та обґрунтуванню доцільності переходу до гібридних інтелектуальних систем. Для глибокого розуміння механізмів деформування конструкцій з вм'ятинами передусім

необхідно звернутися до теоретичного фундаменту класичної механіки оболонок.

Теорія оболонок та класичні підходи аналізу конструкцій з дефектами. Теоретичні основи механіки тонкостінних конструкцій було закладено ще у XIX столітті. Зокрема гіпотеза Кірхгофа-Лява, сформульована Кірхгофом у 1850 р. для пластин та узагальнена Лявом на оболонки, стала фундаментальним наробком класичної теорії [19]. Згідно даної гіпотези приймається, що нормаль до серединної поверхні залишається прямою та нормальною після деформації, а поперечні зсувні деформації нехтуються. Нещодавнє дослідження Озенди та Вірґи [20] підтвердило коректність цієї гіпотези для тонких оболонок, водночас окресливши межі її застосовності. В подальшому систематичний виклад теорії пластин та оболонок надали Тимошенко та Войновський-Кріґер у класичній монографії «Theory of Plates and Shells» [21], яка й досі залишається одним з найбільш цитованих джерел у цій галузі. Тимошенко не лише узагальнив існуючі теорії, але й розвинув методи розрахунку конструкцій складної форми, включаючи циліндричні оболонки під дією тиску та зосереджених навантажень. Паралельно розвивалася лінійна теорія тонких оболонок у працях Новожилова [22], Вентселя та Краутхаммера [23], Вайнберга [24]. Зокрема в монографії [23] автори надали сучасний синтез класичних та чисельних підходів до розрахунку тонкостінних конструкцій, включаючи застосування до циліндричних оболонок під тиском. Ця праця є важливим мостом між аналітичними методами та сучасними обчислювальними підходами. Слід також виділити обмеження застосування класичної теорії Кірхгофа-Лява, яка є асимптотично точною для тонких оболонок (для яких відношення товщини до радіуса $h/R \ll 1$), однак вона стає неадекватною для оболонок середньої товщини та в зонах локальної концентрації напружень (зокрема в околі вм'ятин). Дослідженням цих ефектів присвячено багато праць, однак слід виділити роботи Рейснера і Міндліна [25, 26], що запропонували теорію пластин з урахуванням поперечних зсувних деформацій, виходячи з варіаційного принципу і отримала розвиток в кінематичному підході, де нормаль може повертатися незалежно від серединної поверхні, що еквівалентно введенню додаткових ступенів свободи обертання. Для задач моделювання вм'ятин це має принципове значення, оскільки в зоні дефекту кривизна поверхні змінюється різко, і класична теорія може давати суттєві похибки. Дана теорія набула ключового значення в сучасності у контексті скінченно-елементного моделювання оболонок у більшості сучасних інженерних програмних комплексах для числового моделювання, таких як ANSYS [27], ABAQUS [28] тощо.

В розрізі задачі аналізу НДС в зоні вм'ятин слід також окреслити проблеми пов'язані зі втратою стійкості тонкостінних оболонок, оскільки зовнішній вплив, наприклад жорсткого індентора створює геометричну недосконалість, яка може призвести до

локальної втрати несучої здатності. Роботи Доннелла [29] заклали основу спрощеної нелінійної теорії циліндричних оболонок, що дозволила аналітично досліджувати задачі стійкості при осьовому стисненні та зовнішньому тиску. Флюгге в монографії [30] надав повний виклад теорії напруженого стану оболонок, включаючи нелінійні ефекти та задачі стійкості. Койтер [31, 32] розвинув загальну теорію впливу геометричних недосконалостей на критичне навантаження оболонок. Теорія Койтера пояснила відоме розходження між теоретичними та експериментальними значеннями критичних навантажень для циліндричних оболонок і стала основою сучасних підходів до проектування з урахуванням недосконалостей.

Вагомий внесок в дослідження механіки оболонок зробили і українські вчені. Кантор [33], який відомий працями пов'язаними з чисельними методами розрахунку оболонок, зокрема варіаційно-різницевиими підходами для нелінійних задач. Кантор розвинув методи розв'язання задач для оболонок складної форми з урахуванням великих переміщень та пластичних деформацій. Зокрема у спільних працях Кантор з Шупіковим, Долінським і Онацьким досліджували моделювання оболонок з локальними недосконалостями форми [34, 35]. Гуляєв, Баженов та Гоцуляк [36] систематизували методи розрахунку оболонок складної форми, а Баженов зі співавторами в [37] розвинули метод скінченних елементів для нелінійних задач деформування тонких оболонок. Каюк в [38] розглядав задачі з великими переміщеннями. Ободан, Лебедев та Громов в монографії [39] надали систематичний виклад нелінійної поведінки та стійкості тонкостінних оболонок. Рожок [40] досліджувала просторові задачі теорії пружності для циліндричних оболонок складної геометрії. Шупіков [41] розвинув напрямок динаміки та міцності шаруватих оболонок під імпульсними навантаженнями. Його дослідження охоплюють розрахунок конструкцій складної форми при динамічних впливах, в тому числі і при моделюванні ударного формування вм'ятин [42]. Також безпосередньо проблематиці вм'ятин присвячені роботи Шупікова і Онацького [34, 35, 42] в рамках яких дослідження процесу утворення вм'ятин на циліндричних оболонках проводилися методом СЕ. Спільна праця Онацького з Кантором та Долінським [35] щодо впливу вм'ятин на несучу здатність посудин заклала основу для розвитку цього напрямку. Більш сучасні праці Онацького та Місюри [15, 43] зі швидкої оцінки міцності посудин з вм'ятинами із застосуванням штучного інтелекту продовжують роботу і розширюють в більш сучасні підходи.

Попри значний розвиток фундаментальної класичної теорії оболонок, безпосереднє застосування складних аналітичних залежностей для оцінки локальних дефектів типу вм'ятин часто ускладнене в повсякденній інженерній практиці. Як наслідок, класичні підходи аналізу поступово трансформувалися

у набір спрощених напівемпіричних критеріїв, що лягли в основу чинної нормативної бази.

Серед них API 579-1/ASME FFS-1 [9] є найбільш комплексним документом для оцінки придатності обладнання з дефектами. Частина 12 безпосередньо стосується вм'ятин і передбачає три рівні оцінки з наростаючою складністю. ASME B31G [10] та RSTRENG [44] залишаються основними документами для корозійних дефектів, однак їхній концептуальний підхід суттєво вплинув на загальні методи оцінки іншої геометрії пошкоджень, зокрема вм'ятин. Британський стандарт BS 7910 [11] розглядає дефекти через призму діаграми оцінки руйнування. Водночас DNV-RP-F101 [45] орієнтовано передовсім на морські трубопроводи, а загальноєвропейський EN 13445 [12] встановлює критерії до посудин відповідно до директиви PED 2014/68/EU [1]. В Україні ж безпечна експлуатація подібного обладнання досі здебільшого регулюється правилами НПАОП 0.00-1.07-94 [13], які потребують подальшого розвитку (зокрема гармонізації з API 579 та EN 13445). Слід зазначити, що жоден з існуючих класичних стандартів поки не передбачає використання дата-центричних методів та МН для прямої сертифікаційної оцінки дефектів, що є одним із викликів для їхнього промислового впровадження.

Систематичне дослідження дефектів, що передувало створенню сучасної нормативної бази, розпочалося ще у 1960–70-х роках. Дослідження під керівництвом Кіфнера та Максі привели до створення рівняння NG-18 [46], на базі якого було розроблено ASME B31G [10], а згодом модифікований критерій RSTRENG [44]. Дослідницькою групою EPRG під керівництвом Руверса [47] також проводилося масштабне вивчення механічних пошкоджень трубопроводів, включаючи вм'ятини та їх комбінації з канавками. Ранні критерії прийнятності вм'ятин переважно базувалися на граничній глибині (наприклад, 6% від діаметра) без урахування залишкових напружень та історії формування дефекту [7, 9].

Таким чином, теоретичний фундамент від праць Кірхгофа-Лява до сучасників, в поєднанні з напрацьованою інженерною нормативною базою, створює необхідний мінімум для оцінки деформування тонкостінних конструкцій. Проте, оскільки класичні напівемпіричні методики об'єднує те, що вони розглядають вм'ятину лише як статичне відхилення форми і не розглядають історію та пов'язані з нею процеси утворення, для точного відтворення складних нелінійних явищ необхідно звернутися до чисельного моделювання.

Моделювання процесу утворення вм'ятин. Моделювання процесу утворення вм'ятини на циліндричній оболонці є комплексною задачею, що пов'язана із контактною взаємодією оболонки і жорсткого індентора (штампа), який вдавлюється у поверхню конструкції. В результаті цього процесу, за рахунок пластичних деформацій, формується геометрична недосконалість.

Контакт. Теоретичні основи механіки контакту було закладено в роботах Герца [48, 49], який розв'язав задачу про контакт двох пружних тіл з криволінійними поверхнями. Теорія Герца доволі точно встановлює залежності між силою контакту, площею та взаємним наближенням тіл для випадку малих деформацій у пружній області, однак для задач з пластичним деформуванням є обмежено застосованою. Комплексний виклад контактної механіки також надав Джонсон в монографії [50], в якій він систематизував аналітичні розв'язки для різних конфігурацій контакту та розвинув теорію для випадків ковзання, кочення та удару. Специфіку контакту індентора з тонкостінною оболонкою досліджували Апдайк та Калнінс [51, 52], вони розв'язали задачу про вдавлювання жорсткої сфери у сферичну та циліндричну оболонки з урахуванням великих переміщень та пластичності і показали, що процес формування вм'ятини принципово відрізняється від вдавлювання в масивне тіло через можливість локальної втрати стійкості (проклацування). Калладін в роботі [53] надав фізичну інтерпретацію цього явища.

Фізична нелінійність. При формуванні вм'ятин на конструкціях з вуглецевих та низьколегованих сталей рівні деформацій значно перевищують межу текучості, що вимагає адекватного опису пружно-пластичної поведінки матеріалу. Найбільш поширеною є модель пластичності за критерієм Мізеса з ізотропним або кінематичним зміцненням [54].

Для задач одноразового пластичного деформування ізотропне зміцнення, що описує рівномірне розширення поверхні текучості, зазвичай є достатнім. Однак при циклічному навантаженні (наприклад, при повторному навантаженні внутрішнім тиском після формування вм'ятини) для більш коректного опису ефекту Баушингера необхідно використовувати моделі із кінематичним зміцненням [55], наприклад, за моделлю Прагера [56], або більш досконалою моделлю Шабоша [57] чи загальні підходи теорії пластичності, викладені Люблінером [54].

В праці [58] В'єрбіцький та Су дослідили механізм пластичного деформування труб при поперечному вдавлюванні та запропонували аналітичну модель для оцінки залежності «сила-переміщення» індентора. В їх роботі було продемонстровано, що форма кривої навантаження визначається поєднанням мембранного та згинального механізмів пластичного деформування, причому їхнє співвідношення залежить від відношення глибини вм'ятини до товщини стінки та діаметра труби. Хайд, Луо та Беккер в [59] показали, що форма кривої «сила-переміщення» при вдавлюванні труб під тиском суттєво відрізняється від випадку без тиску через взаємодію мембранних напружень і контактного навантаження.

Геометрична нелінійність. Моделювання вм'ятин неможливе без врахування геометричної нелінійності, оскільки локальні переміщення стінки зазвичай суттєво перевищують її товщину. Цей фактор

вимагає використання мір деформацій, що коректно описують великі переміщення при збереженні об'єму матеріалу.

Залишкові напруження та ефект відпружинювання. Після зняття навантаження оболонка зазнає часткового пружного відновлення форми. Залишкова глибина вм'ятини є меншою за максимальну під навантаженням, а у матеріалі формується складний розподіл залишкових напружень. Хайд, Луо та Беккер [60] показали, що на внутрішній поверхні у вершині вм'ятини виникають розтягуючі залишкові напруження, що можуть досягати межі текучості та сприяють зародженню тріщин. Жао зі співавторами в [61] дослідили відповідь деформацій та напружень при відпружинюванні та вирівнюванні вм'ятин під внутрішнім тиском і встановили, що ці процеси суттєво перерозподіляють залишкові напруження. Для чисельного моделювання проклацування необхідні алгоритми продовження рівноваги: метод довжини дуги Рікса [62] та Крісфілда [63].

Окрім значення має явище часткового вирівнювання вм'ятини під дією внутрішнього тиску. При навантаженні тиском частина залишкових деформацій компенсується, що змінює геометрію дефекту та розподіл напружень. Цей ефект є критичним для оцінки залишкового ресурсу, оскільки визначає фактичну кривизну дефекту при експлуатаційному навантаженні [7, 8]. Дослідження цього процесу в роботі Коушам та Хопкінс [7] продемонстрували, що одним з найбільш критичних параметрів є кривизна вм'ятини, а не лише її глибина. Так, гострі вм'ятини можуть бути небезпечнішими за глибокі, але плавні. Онг, Со та Онг [64] показали, що видовжені вм'ятини створюють нижчі рівні концентрації напружень порівняно з поперечними. Макдональд та Коушам [65] систематизували підходи до оцінки вм'ятин залежно від наявності додаткових пошкоджень та розташування відносно зварних швів.

Отже, процес утворення вм'ятин вимагає врахування контактної взаємодії, пластичності з кінематичним зміцненням, геометричної нелінійності, пружного відновлення та вирівнювання. Кривизна дефекту є більш критичним параметром, ніж його глибина. Для практичного застосування цих підходів необхідні надійні чисельні інструменти.

Чисельне моделювання методом скінченних елементів. Вище було показано, що моделювання складних напружено-деформованих станів, що виникають навколо вм'ятин, традиційними аналітичними методами є надзвичайно складним завданням. Таким чином, майже безальтернативним для цього є використання числових методів, зокрема МСЕ. Теоретичний та практичний фундамент МСЕ було систематизовано у класичних монографіях Зенкевича, Тейлора [66], Бате [67] та Крісфілда [55, 63, 68]. В яких автори надали вичерпний виклад основ методу, включаючи формулювання для задач механіки суцільного середовища, методи побудови скінченних елементів та алгоритми розв'язання систем рівнянь.

Також Бате та Крісфілд систематизували методи розв'язання нелінійних задач [55].

В рамках чисельного моделювання МСЕ вибір типу скінченних елементів є принциповим питанням. Оболонкові елементи ефективні для загальної поведінки конструкцій, однак у зоні з великими перепадами геометрії можуть бути недостатньо точними [67, 69]. Натомість, об'ємні елементи дозволяють точно описати тривимірний НДС, включаючи розподіл напружень по товщині стінки, контактну взаємодію з індентором та залишкові деформації, хоча і вимагають більшої розрахункової потужності. Слід зазначити роботу Дама, Караманос та Греснігт, які в [70] показали, що для неглибоких вм'ятин ($d/D < 4\%$) обидва підходи дають порівнянні результати, тоді як для глибоких - об'ємні елементи забезпечують кращу точність. Оптимальною часто є комбінована стратегія: оболонкові елементи для неушкодженої частини та об'ємні у зоні вм'ятини [27, 67].

Перевірка моделей шляхом порівняння з експериментальними даними є необхідною умовою достовірності. Рен зі співавторами [71] провели масштабну програму натурних випробувань трубопроводів з вм'ятинами, що стали основним бенчмарками для перевірки чисельних моделей на основі [8, 60, 72].

Таким чином, сучасні МСЕ-моделі дозволяють адекватно описати весь процес: контактне формування вм'ятини, пружне відновлення, навантаження тиском та циклічне деформування. Комбіновані стратегії дискретизації та субмоделювання оптимізують співвідношення точності та обчислювальної вартості. Результати чисельного моделювання є вхідними даними для оцінки довговічності конструкцій з вм'ятинами, що базується на положеннях механіки руйнування.

Механіка руйнування та циклічне навантаження. Очевидно, що вм'ятина створює зону підвищеної концентрації напружень, характер якої визначається геометрією дефекту та умовами навантаження. В роботах [14, 34, 42, 71] було доведено, що при навантаженні внутрішнім тиском максимальні напруження виникають на периферії вм'ятини (так званих плечах), де відбувається різка зміна кривизни. Схожі висновки отримали Рувєрс та інші в [47], де показали, що коефіцієнт концентрації напружень може досягати 3–5 для гострих вм'ятин. Натомість Коушам та Хопкінс [7] запропонували використовувати зміни кривизни, як основний показник критичності вм'ятин, оскільки він безпосередньо пов'язаний з додатковими згинальними напруженнями.

Реальні умови експлуатації оболонок з вм'ятинами в промисловості характеризуються нерегулярними змінами тиску, це так зване циклічне навантаження, що може викликати накопичення пошкоджувальності і потребує врахування послідовності навантажень [69, 73]. Отже, для коректного прогнозування довговічності або залишкового ресурсу необхідно моделювати повний процес формування

вм'ятини з розвантаженням та враховувати поступове накопичення пластичних деформацій [8, 71].

Циклічне навантаження внутрішнім тиском може знижувати довговічність конструкції з вм'ятиною. Рінехарт та Кітінг [74] показали, що довговічність може бути на 1 - 2 порядки нижчою за неушкоджену трубу. Піньейро та Паскваліно [75] дослідили комбіновані дефекти «вм'ятина + подряпина» і показали, що подряпина різко знижує довговічність, створюючи початковий концентратор для тріщини.

Теоретичний фундамент оцінки циклічної довговічності базується на класичних законах: кривій Велера [76], законі Коффіна-Менсона [77, 78] та правилі Палмгрена-Майнера [73]. Лінійна пружна механіка руйнування базується на коефіцієнті інтенсивності напружень, введеному Ірвіном [79]. Паріс та Ердоган [80] запропонували закон росту втомної тріщини. Для задач з суттєвою пластичністю, характерних для зони вм'ятини, J -інтеграл Райса [81] є більш коректним параметром. Андерсон [82] надав комплексний виклад практичних застосувань механіки руйнування. Ці підходи залишаються актуальними і наразі, хоча і практична реалізація доволі складна і потребує поєднання з сучасними методами, як наприклад МСЕ та МН.

Отже, оцінка циклічної довговічності конструкцій з вм'ятинами вимагає врахування залишкових напружень, концентрації напружень у зоні зміни кривизни, наявності додаткових дефектів та змінної амплітуди навантаження. Обчислювальна вартість повного МСЕ-аналізу для промислових задач є доволі високою, що стимулює розвиток швидших обчислювальних підходів, зокрема з використанням машинного навчання.

Використання машинного навчання для оцінки залишкового ресурсу. Повне МСЕ-моделювання процесу формування вм'ятини з оцінкою довговічності є витратним з точки зору обчислень [14, 83], що стимулювало розвиток сурогатних моделей - математичних апроксимацій, що навчаються на обмеженому наборі МСЕ-розрахунків і дозволяють швидко прогнозувати відгук конструкції. Штучні нейронні мережі є основним інструментом для побудови таких сурогатних моделей у задачах оцінки дефектів. Типова архітектура зазвичай включає багатошаровий перцептрон з вхідними параметрами дефекту (глибина, довжина, ширина, тощо) та параметрами конструкції (діаметр, товщина стінки, властивості матеріалу) і вихідними параметрами (граничний тиск, максимальні напруження, довговічність). Цзян та Дун в праці [84] розробили інтегровану модель на основі тривимірних згорткових нейронних мереж (так званих 3D-CNN) для оцінки залишкової міцності трубопроводів з випадково розподіленими корозійними дефектами і навантаженим внутрішнім тиском. Ця модель забезпечила точність, порівнянну з МСЕ, при обчислювальному часі менше 1 секунди. Ахмед Сумро у систематичному огляді 106 публікацій [85] показав, що методи глибокого навчання та ансамблеві

алгоритми (градієнтний бустинг, випадковий ліс) є найбільш точними для прогнозування граничного тиску кородованих трубопроводів, а також, що вони перевершують класичні регресійні підходи. Саджадінія зі співавторами в [86] запропонували метрику оцінки похибок сурогатних моделей, а в подальшій роботі [18] розвинули концепцію багаторівневого моделювання, де гібридні моделі комбінують результати розрахунків різного рівня точності. Бен Серіє та інші в [87] застосували метод SHAP (Shapley Additive Explanations) для кількісної оцінки внеску кожного параметра трубопроводу у прогноз режиму руйнування, що забезпечує інтерпретованість ансамблевих МН-моделей і є важливим кроком до їх сертифікаційного застосування.

Згорткові нейронні мережі відкривають нові можливості: замість параметричного опису на вхід мережі подається безпосередньо карта геометрії дефекту, отримана внутрішньою трубною інспекцією. Рахман та Ратнаєке в [88] представили підхід до автоматичної класифікації та оцінки дефектів на основі даних інспекції, що демонструє перехід від ручної інтерпретації до автоматизованої оцінки.

Перера та Аграваль в [89] запропонували багаторівневу архітектуру графових нейронних мереж (GNN) з адаптивним згущенням сітки для їх сурогатної моделі, що дало значний ефект в прискоренні симуляцій, цей підхід відкриває широкі перспективи використання топологічної структури SE-сіток безпосередньо як вхідних даних для навчання.

Фізично поінформовані нейронні мережі (ФПНМ), запропоновані Раїсі зі співавторами в [90], вбудовують диференціальні рівняння (рівняння рівноваги, умови сумісності) безпосередньо у функцію втрат мережі, що дозволяє навчатися на обмежених даних. Крішнапрійан в [91] показали, що для задач з різкими градієнтами, характерними для зон вм'ятин, стандартні ФПНМ можуть мати проблеми зі збіжністю. Також слід зазначити, що застосування ФПНМ до задач з контактом, пластичністю та великими деформаціями залишається відкритою проблемою.

Якість сурогатної моделі критично залежить від навчальної вибірки. Борісут та Нучітпрасіттічай [92] запропонували адаптивний метод рівномірного розподілу точок у параметричному просторі. Салтеллі та інші [93] розвинули метод оцінки повних індексів чутливості, що дозволяє кількісно визначити внесок кожного параметра дефекту у варіабельність відгуку. Талер, Шнайдер та Бухер [94] показали, що адаптивне формування вибірки може зменшити кількість SE-розрахунків на 30–50 % при збереженні точності. Бабуджан, Водка та Шаповалова в публікації [95] досліджували застосування обчислювального інтелекту для оцінки НДС гетерогенних матеріалів, а Чопорова та Лісняк [96] - оптимізацію архітектури нейронної мережі генетичним алгоритмом, для задач пластин і оболонок з отворами.

В контексті застосування МН також слід зазначити перспективну концепцію цифрового двійника [17], що передбачає інтеграцію SE-моделей

або МН-сурогатів з системами моніторингу реального часу [97]. Для вм'ятин це означає можливість відстеження еволюції дефекту (відпружинювання під тиском, зародження тріщини) в реальному часі та можливість оперативного оновлення прогнозу залишкового ресурсу.

Отже, обчислювальні методи на основі нейронних мереж демонструють здатність забезпечити прогнозування, порівнянне з МСЕ, при зменшенні обчислювального часу на порядки. ФПНМ відкривають нові перспективи, проте їх застосування до нелінійних задач з дефектами потребує подальшого розвитку. Результати сучасного чисельного та сурогатного моделювання формують всебічну базу для побудови інтелектуального цифрового двійника, що стане наступним закономірним кроком у розширенні інженерної практики.

Висновки. Проведений систематичний огляд показав еволюцію підходів до оцінки міцності циліндричних конструкцій з локальними дефектами типу вм'ятин. Від класичної лінійної теорії оболонок і напівемпіричних нормативних методик, до складного нелінійного чисельного моделювання та сучасних дата-центричних парадигм. Спираючись на надійний теоретичний фундамент, сучасні методи скінченних елементів можуть відтворювати весь складний процес формування вм'ятини, що включає: контактне зародження дефекту, пружне відновлення форми, перерозподіл залишкових напружень та розпрямлення під дією внутрішнього тиску.

Водночас, висока обчислювальна вартість повного просторового моделювання стає суттєвою перешкодою для його застосування в умовах інженерної практики де критична швидкість прийняття рішень, особливо в задачах оцінки циклічної довговічності. Розуміння багатofакторності руйнування, де одночасно діють геометрична та фізична нелінійності, концентрації напружень, а також накопичення пошкоджень під час циклічного навантаження, вимагає створення компактніших та швидших інструментів аналізу, що здатні екстрапольовати обмежені дані натурних або чисельних експериментів.

Таким чином, найбільш перспективним та закономірним напрямком подальшого розвитку є впровадження методів на основі штучного інтелекту та машинного навчання, зокрема сурогатних та фізично поінформованих нейронних мереж, які здатні апроксимувати багатовимірні нелінійні процеси. Такі інтелектуальні системи дозволяють на порядки знижувати час виконання розрахунків за збереженням точності, порівнянної з повноцінними чисельними моделюваннями.

Підсумовуючи, слід зазначити, що майбутнє у сфері розрахунків на міцність та прогнозування живучості пошкоджених оболонок напевно лежить у площині гібридних підходів. Інтеграція масивів даних детермінованого чисельного аналізу з можливостями алгоритмів штучного інтелекту формує наукову та технологічну базу для розробки повноцінних цифрових

двійників обладнання. Це дозволить реалізувати перехід від реактивної до предиктивної стратегії оцінки залишкового ресурсу та забезпечення надійної

експлуатації відповідальних інфраструктурних об'єктів.



Інформація щодо наборів даних.

Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

Заява щодо фінансування та подяки.

Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Заява щодо конфлікту інтересів.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту.

У процесі підготовки цієї роботи автори використовували: Perplexity AI, Claude Sonnet 4.6, Grammarly. З метою пошуку літератури, перевірки граматики і перекладу. Весь згенерований контент було перевірено та відредаговано авторами. Авторі несуть повну відповідальність за зміст публікації

Список літератури

- [1] G. Grillone, A. Muratore, E. Genco, A. Firenze, M. Bellissimo, G. Giannelli, and V. Nastasi, "Safe management and risk evaluation of pressure pipes in the process and energy industry", *Chem. Eng. Trans.*, vol. 111, pp. 301–306, 2024, doi: <https://doi.org/10.3303/CET24111051>.
- [2] C. P. Vetter, L. A. Kuebel, D. Natarajan, and R. A. Mentzer, "Review of failure trends in the US natural gas pipeline industry: An in-depth analysis of transmission and distribution system incidents", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 60, pp. 317–333, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.014>.
- [3] A. Szurlej, M. Łaciak, O. Boiko, and A. Olijnyk, "The natural gas sector in Ukraine – opportunities and barriers to growth", *Polityka Energetyczna – Energy Policy J.*, vol. 22, no. 4, pp. 115–128, 2019, doi: <https://doi.org/10.33223/epi/112760>.
- [4] N. Gaurina-Medimurec, K. Novak Mavar, K. Simon, and F. Djerđji, "Accidents in oil and gas pipeline transportation systems", *Energies*, vol. 18, no. 15, p. 4056, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18154056>.
- [5] G. A. Papadakis, "Major hazard pipelines: A comparative study of onshore transmission accidents", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 12, no. 1, pp. 91–107, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(98\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(98)00048-5).
- [6] H. A. Kishawy and H. A. Gabbar, "Review of pipeline integrity management practices", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 87, no. 7, pp. 373–380, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.04.003>.
- [7] A. Cosham and P. Hopkins, "The effect of dents in pipelines – guidance in the pipeline defect assessment manual", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 81, no. 2, pp. 127–139, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2003.11.004>.
- [8] Z. He and W. Zhou, "Development of machine learning-based burst capacity models for pipelines containing dent-gouges with synthetic full-scale burst test data generated using tabular generative adversarial network", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 133, p. 108090, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108090>.
- [9] *API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-for-Service*, 3rd ed., American Petroleum Institute / American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [10] *ASME B31G – Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [11] *BS 7910:2019 – Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*, British Standards Institution, 2019.
- [12] *EN 13445:2021 Unfired Pressure Vessels (Parts 1–6)*, European Committee for Standardization, 2021.
- [13] *НПАОП 0.00-1.07-94. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском*, Держнаглядохоронпраці України, 1994.
- [14] J. Cai, X. Jiang, and G. Lodewijks, "Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending", *Ships Offshore Struct.*, vol. 13, no. 5, pp. 519–531, 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1430200>.
- [15] R. Onatskyi and S. Misiura, "Development of a methodology for rapid strength assessment of dented pressure vessels using AI: Dataset formation for plates under pressure", *Bull. Natl. Tech. Univ. "KhPI". Ser.: Dyn. Strength Mach.*, no. 1, pp. 60–68, 2025, doi: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.1.331577>.
- [16] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2009, doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.
- [17] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.
- [18] S. S. Sajjadinia, B. Carpentieri, D. Shriram, and G. A. Holzapfel, "Multi-fidelity surrogate modeling through hybrid machine learning for biomechanical and finite element analysis of soft tissues", *Comput. Biol. Med.*, vol. 148, p. 105699, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105699>.
- [19] A. E. H. Love, *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th ed. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2013.
- [20] O. Ozenda and E. G. Virga, "On the Kirchhoff-Love hypothesis (revised and vindicated)", *J. Elasticity*, vol. 143, no. 2, pp. 359–384, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10659-021-09819-7>.
- [21] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [22] V. V. Novozhilov, *The Theory of Thin Shells*, P. G. Lowe, Trans.; J. R. M. Radok, Ed. Groningen, Netherlands: P. Noordhoff, 1964.
- [23] E. Ventsel and T. Krauthammer, *Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2001, doi: <https://doi.org/10.1201/9780203908723>.
- [24] Д. В. Вайнберг, *Розрахунок пластин*. Київ: Будівельник, 1970.
- [25] E. Reissner, "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates", *J. Appl. Mech.*, vol. 12, no. 2, pp. A69–A77, 1945, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4009435>.
- [26] R. D. Mindlin, "Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates", *J. Appl. Mech.*, vol. 18, no. 1, pp. 31–38, 1951, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4010217>.
- [27] Ansys, "Ansys Mechanical APDL Programmer's Reference, Release 25.R1", 2025. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://www.ansys.com>.
- [28] Dassault Systèmes, "Abaqus Documentation, Release 2025", 2025. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://www.3ds.com>.
- [29] L. H. Donnell, *Beams, Plates, and Shells*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1976.
- [30] W. Flügge, *Stresses in Shells*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 1973.
- [31] W. T. Koiter, "On the stability of elastic equilibrium", Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson AFB, OH, USA, Tech. Rep. AFFDL-TR-70-25, 1970.
- [32] W. T. Koiter, "The effect of axisymmetric imperfections on the buckling of cylindrical shells under axial compression", *Proc. K. Ned. Akad. Wet., Ser. B*, vol. 66, pp. 265–279, 1963.
- [33] B. Y. Kantor, *Nonlinear problems in the theory of inhomogeneous shallow shells*, Foreign Technology Division, Wright-Patterson AFB, OH, USA, Tech. Rep. AD-765543, 1973.
- [34] Р. Л. Онацький, "Утворення круглої вм'ятини на циліндричній оболонці вдавлюванням штампу", *Вісн. НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин*, № 1 (63), с. 106–113, 2011. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://jds.m.khpi.edu.ua/article/view/49447>.

- [35] Б. Я. Кантор, В. М. Долінський, і Р. Л. Онацький, "Вплив вм'ятин на тримкість посудин", *Вісн. НТУ «ХПІ»*, Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія, № 14, с. 99–106, 2010. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19894>.
- [36] В. І. Гуляев, В. А. Баженов, і Е. А. Гоцуляк, *Розрахунок оболонок складної форми*. Київ: Будівельник, 1990.
- [37] В. А. Баженов, В. К. Цихановський, і В. М. Кислюк, *Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок*. Київ: КНУБА, 2000.
- [38] Я. Ф. Каюк, *Геометрично нелінійні задачі теорії пластин і оболонок*. Київ: Наукова думка, 1987.
- [39] N. I. Obodan, O. G. Lebedev, and V. A. Gromov, *Nonlinear Behaviour and Stability of Thin-Walled Shells*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6365-4>.
- [40] Л. С. Рожок, "Просторові задачі теорії пружності для циліндричних оболонок складної геометрії та структури", дис. д-ра техн. наук, Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, 2019.
- [41] A. Shupikov and N. Dolgoplova, "Dynamic response of multilayer cylinders: Three-dimensional elasticity theory", *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 1, no. 2, pp. 205–222, 2006, doi: <https://doi.org/10.2140/jomms.2006.1.205>.
- [42] Б. Я. Кантор, О. Н. Шупіков, та Р. Л. Онацький, "Вм'ятини на циліндричній оболонці, утворена ударом", *Вісн. НТУ «ХПІ»*, Серія: Динаміка та міцність машин, № 1 (67), с. 44–49, 2012. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://jds.kpi.edu.ua/article/view/49397>.
- [43] Р. Л. Онацький і С. Ю. Місюра, "Швидка оцінка міцності пластин і оболонок зі вм'ятинами засобами штучного інтелекту", у *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXXIII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025*, Харків, 2025, с. 579, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15520692>.
- [44] S. B. Cunha and T. A. Netto, "Analytical assessment of the remaining strength of corroded pipelines and comparison with experimental criteria", *J. Pressure Vessel Technol.*, vol. 139, no. 3, p. 031701, 2017, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4034409>.
- [45] *DNV-RP-F101 Corroded Pipelines*, amended 2025, Det Norske Veritas, 2019.
- [46] J. F. Kiefner, W. A. Maxey, R. J. Eiber, and A. R. Duffy, "Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders", in *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*, ASTM STP 536, Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1973, pp. 461–481, doi: <https://doi.org/10.1520/STP49657S>.
- [47] P. Roovers, M. R. Galli, R. J. Bood, U. Marewski, M. Steiner, and M. Zarea, "EPRG methods for assessing the tolerance and resistance of pipelines to external damage. Pt. 1", *3R Int.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 739–744, 1999.
- [48] H. Hertz, "Über die Berührung fester elastischer Körper [On the contact of elastic solids]", *J. Reine Angew. Math.*, vol. 92, pp. 156–171, 1882, doi: <https://doi.org/10.1515/crll.1882.92.156>.
- [49] H. Hertz, *On the Contact of Rigid Elastic Solids and on Hardness*. New York, NY, USA: Macmillan and Co., 1896. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://archive.org/details/cu31924012500306>.
- [50] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1985, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>.
- [51] D. P. Updike and A. Kalnins, "Axisymmetric behavior of an elastic spherical shell compressed between rigid plates", *J. Appl. Mech.*, vol. 37, no. 3, pp. 635–640, 1970, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3408592>.
- [52] D. P. Updike and A. Kalnins, "Contact pressure between an elastic spherical shell and a rigid plate", *J. Appl. Mech.*, vol. 39, no. 4, pp. 1110–1114, 1972, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3422838>.
- [53] C. R. Calladine, *Theory of Shell Structures*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2010, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>.
- [54] J. Lubliner, *Plasticity Theory*, rev. ed. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2008.
- [55] R. de Borst, M. A. Crisfield, J. J. C. Remmers, and C. V. Verhoosel, *Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2012, ISBN: 978-1-118-37601-0.
- [56] W. Prager, "A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids", *J. Appl. Mech.*, vol. 23, no. 4, pp. 493–496, 1956, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4011389>.
- [57] J. L. Chaboche, "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity", *Int. J. Plast.*, vol. 2, no. 2, pp. 149–188, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(86\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0749-6419(86)90010-0).
- [58] T. Wierzbicki and M. S. Suh, "Indentation of tubes under combined loading", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 30, no. 3–4, pp. 229–248, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(88\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0020-7403(88)90057-4).
- [59] T. H. Hyde, R. Luo, and A. A. Becker, "Prediction of force-deflection behaviour of pressurised pipes subjected to axially long radial indentation", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 82, no. 8, pp. 625–637, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.02.001>.
- [60] T. H. Hyde, R. Luo, and A. A. Becker, "Elastic-plastic response of unpressurised pipes subjected to axially-long radial indentation", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 1949–1971, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.07.004>.
- [61] P. Zhao, J. Shuai, K. Xu, C. Pan, and J. Wang, "Strain and stress responses of the springback and rounding processes of dented pipelines", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 211, p. 105289, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105289>.
- [62] E. Riks, "An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 15, no. 7, pp. 529–551, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(79\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(79)90081-7).
- [63] M. A. Crisfield, "A fast incremental/iterative solution procedure that handles 'snap-through'", *Comput. Struct.*, vol. 13, no. 1–3, pp. 55–62, 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(81\)90108-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(81)90108-5).
- [64] L. S. Ong, A. K. Soh, and J. H. Ong, "Experimental and finite element investigation of a local dent on a pressurized pipe", *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 27, no. 3, pp. 177–185, 1992, doi: <https://doi.org/10.1243/03093247V273177>.
- [65] K. A. Macdonald and A. Cosham, "Best practice for the assessment of defects in pipelines – Gouges and dents", *Eng. Failure Anal.*, vol. 12, no. 5, pp. 720–745, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.011>.
- [66] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and S. Govindjee, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 8th ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2025, ISBN: 9780443160455.
- [67] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA, USA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.
- [68] M. A. Crisfield, *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, vol. 1: Essentials. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1991.
- [69] J. L. C. Diniz, R. D. Vieira, J. T. P. Castro, A. C. Benjamin, and J. L. F. Freire, "Stress and strain analysis of pipelines with localized metal loss", *Exp. Mech.*, vol. 46, no. 6, pp. 765–775, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-006-9826-6>.
- [70] E. Dama, S. A. Karamanos, and A. M. Gresnigt, "Failure of locally buckled pipelines", *J. Pressure Vessel Technol.*, vol. 129, no. 2, pp. 272–279, 2007, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2716431>.
- [71] P. Ren, Y. Fu, J. He, N. Li, L. Zhu, Y. Gu, Y. Xiang, and B. Jia, "Effect of residual plastic strain on the fatigue failure mechanism and service life prediction of dented X80 pipelines", *Materials*, vol. 19, no. 5, p. 967, 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/ma19050967>.
- [72] A. J. Rinehart and P. B. Keating, "Stress concentration solution for a 2D dent in an internally pressurized cylinder", *J. Eng. Mech.*, vol. 133, no. 7, pp. 792–800, 2007, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:7\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:7(792)).
- [73] M. A. Miner, "Cumulative damage in fatigue", *J. Appl. Mech.*, vol. 12, no. 3, pp. A159–A164, 1945, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4009458>.
- [74] A. J. Rinehart and P. B. Keating, "Fatigue life prediction for short dents in petroleum pipelines", in *Proc. ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conf.*, Vancouver, BC, Canada, 2002, pp. 103–111, doi: <https://doi.org/10.1115/PVP2002-1268>.
- [75] B. C. Pinheiro and I. P. Pasqualino, "Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure", *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 5, pp. 962–973, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.09.006>.
- [76] A. Wöhler, *Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl*. Berlin, Germany: Ernst & Korn, 1870. Дата звернення: 01.03.2026 [Online]. Доступно: <https://books.google.at/books?id=VpTKLIX5Wj4C>

- [77] L. F. Coffin, Jr., "A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal", *Trans. ASME*, vol. 76, no. 6, pp. 931–949, 1954, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4015020>.
- [78] S. S. Manson, "Fatigue: A complex subject — some simple approximations", *Exp. Mech.*, vol. 5, no. 7, pp. 193–226, 1965, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02321056>.
- [79] G. R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate", *J. Appl. Mech.*, vol. 24, no. 3, pp. 361–364, 1957, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4011547>.
- [80] P. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws", *J. Basic Eng.*, vol. 85, no. 4, pp. 528–533, 1963, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3656900>.
- [81] J. R. Rice, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks", *J. Appl. Mech.*, vol. 35, no. 2, pp. 379–386, 1968, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3601206>.
- [82] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [83] B. N. Leis, A. Eshraghi, B. Dew, and F. Cheng, "Dent strain and stress analyses and implications concerning API RP 1183 – Part II: Examples of dent geometry and strain analyses during contact and re-rounding", *J. Pipeline Sci. Eng.*, vol. 4, no. 2, p. 100173, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100173>.
- [84] F. Jiang and S. Dong, "Development of an integrated deep learning-based remaining strength assessment model for pipelines with random corrosion defects subjected to internal pressures", *Mar. Struct.*, vol. 96, p. 103637, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103637>.
- [85] A. Ahmed Soomro, A. Akmar Mokhtar, H. B. Hussin, N. Lashari, T. L. Oladosu, S. M. Jameel, and M. Inayat, "Analysis of machine learning models and data sources to forecast burst pressure of petroleum corroded pipelines: A comprehensive review", *Eng. Failure Anal.*, vol. 155, p. 107747, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107747>.
- [86] S. S. Sajjadinia, B. Carpentieri, and G. A. Holzapfel, "A pointwise evaluation metric to visualize errors in machine learning surrogate models", *Front. Artif. Intell. Appl.*, vol. 345, pp. 26–34, 2021, doi: <https://doi.org/10.3233/FAIA210386>.
- [87] M. E. A. Ben Seghier, O. A. Mohamed, and H. Ouair, "Machine learning-based Shapley additive explanations approach for corroded pipeline failure mode identification", *Structures*, vol. 65, p. 106653, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106653>.
- [88] A. Rachman and R. M. C. Ratnayake, "Machine learning approach for risk-based inspection screening assessment", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 185, pp. 518–532, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.02.008>.
- [89] R. Perera and V. Agrawal, "Multiscale graph neural networks with adaptive mesh refinement for accelerating mesh-based simulations", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 429, p. 117152, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117152>.
- [90] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis, "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations", *J. Comput. Phys.*, vol. 378, pp. 686–707, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.
- [91] A. S. Krishnapriyan, A. Gholami, S. Zhe, R. M. Kirby, and M. W. Mahoney, "Characterizing possible failure modes in physics-informed neural networks", *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 34, pp. 26548–26560, 2021, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.01050>.
- [92] P. Borisut and A. Nuchtprasittichai, "Adaptive Latin Hypercube Sampling for a surrogate-based optimization with artificial neural network", *Processes*, vol. 11, no. 11, p. 3232, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/pr11113232>.
- [93] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, and S. Tarantola, "Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index", *Comput. Phys. Commun.*, vol. 181, no. 2, pp. 259–270, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- [94] K. Thaler, R. Schneider, and C. Bucher, "Training data selection for machine learning-enhanced Monte Carlo simulations in structural dynamics", *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 2, p. 581, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12020581>.
- [95] R. A. Babudzhan, O. O. Vodka, and M. I. Shapovalova, "Application of computational intelligence methods for the heterogeneous material stress state evaluation", *Her. Adv. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 198–209, 2022, doi: <https://doi.org/10.15276/hait.05.2022.15>.
- [96] O. V. Choporova and A. O. Lisniak, "The use of a genetic algorithm for optimizing the parameters of the neural network in predicting the stress-strain state of a squared plate", *Appl. Quest. Math. Model.*, vol. 3, no. 2.1, pp. 164–174, 2020, doi: <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.27>.
- [97] M. Azimi, A. D. Eslamlou, and G. Pekcan, "Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review", *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2778, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20102778>.

References (transliterated)

- [1] G. Grillone, A. Muratore, E. Genco, A. Firenze, M. Bellissimo, G. Giannelli, and V. Nastasi, "Safe management and risk evaluation of pressure pipes in the process and energy industry", *Chem. Eng. Trans.*, vol. 111, pp. 301–306, 2024, doi: <https://doi.org/10.3303/CET24111051>.
- [2] C. P. Vetter, L. A. Kuebel, D. Natarajan, and R. A. Mentzer, "Review of failure trends in the US natural gas pipeline industry: An in-depth analysis of transmission and distribution system incidents", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 60, pp. 317–333, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.014>.
- [3] A. Szurlej, M. Łaciak, O. Boiko, and A. Olijnyk, "The natural gas sector in Ukraine – opportunities and barriers to growth", *Polityka Energetyczna – Energy Policy J.*, vol. 22, no. 4, pp. 115–128, 2019, doi: <https://doi.org/10.33223/epj/112760>.
- [4] N. Gaurina-Medimurec, K. Novak Mavar, K. Simon, and F. Djerdj, "Accidents in oil and gas pipeline transportation systems", *Energies*, vol. 18, no. 15, p. 4056, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18154056>.
- [5] G. A. Papadakis, "Major hazard pipelines: A comparative study of onshore transmission accidents", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 12, no. 1, pp. 91–107, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(98\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(98)00048-5).
- [6] H. A. Kishawy and H. A. Gabbar, "Review of pipeline integrity management practices", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 87, no. 7, pp. 373–380, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.04.003>.
- [7] A. Cosham and P. Hopkins, "The effect of dents in pipelines – guidance in the pipeline defect assessment manual", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 81, no. 2, pp. 127–139, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2003.11.004>.
- [8] Z. He and W. Zhou, "Development of machine learning-based burst capacity models for pipelines containing dent-gouges with synthetic full-scale burst test data generated using tabular generative adversarial network", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 133, p. 108090, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108090>.
- [9] *API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-for-Service*, 3rd ed., American Petroleum Institute / American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [10] *ASME B31G – Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines*, American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [11] *BS 7910:2019 – Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*, British Standards Institution, 2019.
- [12] *EN 13445:2021 Unfired Pressure Vessels (Parts 1–6)*, European Committee for Standardization, 2021.
- [13] *NPAOP 0.00-1.07-94. Pravyla budovy i bezpechnoi ekspluatatsii posudyn, shcho pratsiuut pid tyskom*, Derzhnahliadokhoronpratsi Ukrainy, 1994.
- [14] J. Cai, X. Jiang, and G. Lodewijks, "Numerical investigation of residual ultimate strength of dented metallic pipes subjected to pure bending", *Ships Offshore Struct.*, vol. 13, no. 5, pp. 519–531, 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1430200>.
- [15] R. Onatskyi and S. Misiura, "Development of a methodology for rapid strength assessment of dented pressure vessels using AI: Dataset formation for plates under pressure", *Bull. Natl. Tech. Univ. "KhPI". Ser.: Dyn. Strength Mach.*, no. 1, pp. 60–68, 2025, doi: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2025.1.331577>.
- [16] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2009, doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.

- [17] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.
- [18] S. S. Sajjadinia, B. Carpentieri, D. Shriram, and G. A. Holzapfel, "Multi-fidelity surrogate modeling through hybrid machine learning for biomechanical and finite element analysis of soft tissues", *Comput. Biol. Med.*, vol. 148, p. 105699, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105699>.
- [19] A. E. H. Love, *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th ed. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2013.
- [20] O. Ozenda and E. G. Virga, "On the Kirchhoff-Love hypothesis (revised and vindicated)", *J. Elasticity*, vol. 143, no. 2, pp. 359–384, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10659-021-09819-7>.
- [21] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [22] V. V. Novozhilov, *The Theory of Thin Shells*, P. G. Lowe, Trans.; J. R. M. Radok, Ed. Groningen, Netherlands: P. Noordhoff, 1964.
- [23] E. Ventsel and T. Krauthammer, *Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2001, doi: <https://doi.org/10.1201/9780203908723>.
- [24] D. V. Vainberh, *Rozrakhunok plastyn*. Kyiv: Budivelnik, 1970.
- [25] E. Reissner, "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates", *J. Appl. Mech.*, vol. 12, no. 2, pp. A69–A77, 1945, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4009435>.
- [26] R. D. Mindlin, "Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates", *J. Appl. Mech.*, vol. 18, no. 1, pp. 31–38, 1951, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4010217>.
- [27] Ansys, "Ansys Mechanical APDL Programmer's Reference, Release 25.R1", 2025. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://www.ansys.com>.
- [28] Dassault Systèmes, "Abaqus Documentation, Release 2025", 2025. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://www.3ds.com>.
- [29] L. H. Donnell, *Beams, Plates, and Shells*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1976.
- [30] W. Flügge, *Stresses in Shells*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 1973.
- [31] W. T. Koiter, "On the stability of elastic equilibrium", Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson AFB, OH, USA, Tech. Rep. AFFDL-TR-70-25, 1970.
- [32] W. T. Koiter, "The effect of axisymmetric imperfections on the buckling of cylindrical shells under axial compression", *Proc. K. Ned. Akad. Wet., Ser. B*, vol. 66, pp. 265–279, 1963.
- [33] B. Y. Kantor, *Nonlinear problems in the theory of inhomogeneous shallow shells*, Foreign Technology Division, Wright-Patterson AFB, OH, USA, Tech. Rep. AD-765543, 1973.
- [34] R. L. Onatskyi, "Utvorennia kruhloï vmiatyny na tsylindrychnii obolonci vdvliuvanniam shtampu", *Visn. NTU «KhPI». Serii: Dynamika ta mitsnist mashyn*, № 1 (63), s. 106–113, 2011. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://jds.m.khpi.edu.ua/article/view/49447>.
- [35] B. Ya. Kantor, V. M. Dolinskyi, i R. L. Onatskyi, "Vplyv vmiatyn na trymkist posudyn", *Visn. NTU «KhPI», Serii: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia*, № 14, s. 99–106, 2010. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19894>.
- [36] V. I. Huliaiev, V. A. Bazhenov, i E. A. Hotsuliak, *Rozrakhunok obolonok skladnoi formy*. Kyiv: Budivelnik, 1990.
- [37] V. A. Bazhenov, V. K. Tsykhanovskiy, i V. M. Kyslooskiy, *Metod skinchennykh elementiv u zadachakh nelininoho deformuvannia tonkykh ta miakyykh obolonok*. Kyiv: KNUBA, 2000.
- [38] Ya. F. Kaiuk, *Heometrychno neliniini zadachi teorii plastyn i obolonok*. Kyiv: Naukova dumka, 1987.
- [39] N. I. Obodan, O. G. Lebedevyev, and V. A. Gromov, *Nonlinear Behaviour and Stability of Thin-Walled Shells*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6365-4>.
- [40] L. S. Rozhok, "Prostorovi zadachi teorii pruzhnosti dlia tsylindrychnykh obolonok skladnoi heometrii ta struktury", dys. d-ra tekhn. nauk, Instytut mekhaniky im. S. P. Tymoshenka NAN Ukrainy, Kyiv, 2019.
- [41] A. Shupikov and N. Dolgopolova, "Dynamic response of multilayer cylinders: Three-dimensional elasticity theory", *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 1, no. 2, pp. 205–222, 2006, doi: <https://doi.org/10.2140/jomms.2006.1.205>.
- [42] B. Ya. Kantor, O. N. Shupikov, ta R. L. Onatskyi, "Vmtyna na tsylindrychnii obolonci, utvorena udarom", *Visn. NTU «KhPI». Serii: Dynamika ta mitsnist mashyn*, № 1 (67), s. 44–49, 2012. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://jds.m.khpi.edu.ua/article/view/49397>.
- [43] R. L. Onatskyi i S. Yu. Misiura, "Shvydka otsinka mitsnosti plastyn i obolonok zi vmiatynamy zasobamy shtuchnoho intelektu", u *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dop. KhXKhIII mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2025*, Kharkiv, 2025, s. 579, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15520692>.
- [44] S. B. Cunha and T. A. Netto, "Analytical assessment of the remaining strength of corroded pipelines and comparison with experimental criteria", *J. Pressure Vessel Technol.*, vol. 139, no. 3, p. 031701, 2017, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4034409>.
- [45] *DNV-RP-F101 Corroded Pipelines*, amended 2025, Det Norske Veritas, 2019.
- [46] J. F. Kiefner, W. A. Maxey, R. J. Eiber, and A. R. Duffy, "Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders", in *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*, ASTM STP 536, Philadelphia, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1973, pp. 461–481, doi: <https://doi.org/10.1520/STP49657S>.
- [47] P. Roovers, M. R. Galli, R. J. Bood, U. Marewski, M. Steiner, and M. Zarea, "EPRG methods for assessing the tolerance and resistance of pipelines to external damage. Pt. 1", *3R Int.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 739–744, 1999.
- [48] H. Hertz, "Über die Berührung fester elastischer Körper [On the contact of elastic solids]", *J. Reine Angew. Math.*, vol. 92, pp. 156–171, 1882, doi: <https://doi.org/10.1515/crll.1882.92.156>.
- [49] H. Hertz, *On the Contact of Rigid Elastic Solids and on Hardness*. New York, NY, USA: Macmillan and Co., 1896. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://archive.org/details/cu31924012500306>.
- [50] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1985, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>.
- [51] D. P. Updike and A. Kalnins, "Axisymmetric behavior of an elastic spherical shell compressed between rigid plates", *J. Appl. Mech.*, vol. 37, no. 3, pp. 635–640, 1970, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3408592>.
- [52] D. P. Updike and A. Kalnins, "Contact pressure between an elastic spherical shell and a rigid plate", *J. Appl. Mech.*, vol. 39, no. 4, pp. 1110–1114, 1972, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3422838>.
- [53] C. R. Calladine, *Theory of Shell Structures*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2010, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511624278>.
- [54] J. Lubliner, *Plasticity Theory*, rev. ed. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2008.
- [55] R. de Borst, M. A. Crisfield, J. J. C. Remmers, and C. V. Verhoosel, *Nonlinear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2012, ISBN: 978-1-118-37601-0.
- [56] W. Prager, "A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids", *J. Appl. Mech.*, vol. 23, no. 4, pp. 493–496, 1956, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4011389>.
- [57] J. L. Chaboche, "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity", *Int. J. Plast.*, vol. 2, no. 2, pp. 149–188, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(86\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0749-6419(86)90010-0).
- [58] T. Wierzbicki and M. S. Suh, "Indentation of tubes under combined loading", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 30, no. 3–4, pp. 229–248, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(88\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0020-7403(88)90057-4).
- [59] T. H. Hyde, R. Luo, and A. A. Becker, "Prediction of force-deflection behaviour of pressurised pipes subjected to axially long radial indentation", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 82, no. 8, pp. 625–637, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2005.02.001>.
- [60] T. H. Hyde, R. Luo, and A. A. Becker, "Elastic-plastic response of unpressurised pipes subjected to axially-long radial indentation", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 1949–1971, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecs.2005.07.004>.
- [61] P. Zhao, J. Shuai, K. Xu, C. Pan, and J. Wang, "Strain and stress responses of the springback and rounding processes of dented pipelines", *Int. J. Pressure Vessels Piping*, vol. 211, p. 105289, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105289>.
- [62] E. Riks, "An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 15, no. 7, pp. 529–551, 1979, doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(79\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(79)90081-7).

- [63] M. A. Crisfield, "A fast incremental/iterative solution procedure that handles 'snap-through'", *Comput. Struct.*, vol. 13, no. 1–3, pp. 55–62, 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(81\)90108-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(81)90108-5).
- [64] L. S. Ong, A. K. Soh, and J. H. Ong, "Experimental and finite element investigation of a local dent on a pressurized pipe", *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 27, no. 3, pp. 177–185, 1992, doi: <https://doi.org/10.1243/03093247V273177>.
- [65] K. A. Macdonald and A. Cosham, "Best practice for the assessment of defects in pipelines – Gouges and dents", *Eng. Failure Anal.*, vol. 12, no. 5, pp. 720–745, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.011>.
- [66] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and S. Govindjee, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 8th ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2025, ISBN: 9780443160455.
- [67] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA, USA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.
- [68] M. A. Crisfield, *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, vol. 1: Essentials. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1991.
- [69] J. L. C. Diniz, R. D. Vieira, J. T. P. Castro, A. C. Benjamin, and J. L. F. Freire, "Stress and strain analysis of pipelines with localized metal loss", *Exp. Mech.*, vol. 46, no. 6, pp. 765–775, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-006-9826-6>.
- [70] E. Dama, S. A. Karamanos, and A. M. Gresnigt, "Failure of locally buckled pipelines", *J. Pressure Vessel Technol.*, vol. 129, no. 2, pp. 272–279, 2007, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2716431>.
- [71] P. Ren, Y. Fu, J. He, N. Li, L. Zhu, Y. Gu, Y. Xiang, and B. Jia, "Effect of residual plastic strain on the fatigue failure mechanism and service life prediction of dented X80 pipelines", *Materials*, vol. 19, no. 5, p. 967, 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/ma19050967>.
- [72] A. J. Rinehart and P. B. Keating, "Stress concentration solution for a 2D dent in an internally pressurized cylinder", *J. Eng. Mech.*, vol. 133, no. 7, pp. 792–800, 2007, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:7\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:7(792)).
- [73] M. A. Miner, "Cumulative damage in fatigue", *J. Appl. Mech.*, vol. 12, no. 3, pp. A159–A164, 1945, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4009458>.
- [74] A. J. Rinehart and P. B. Keating, "Fatigue life prediction for short dents in petroleum pipelines", in *Proc. ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conf.*, Vancouver, BC, Canada, 2002, pp. 103–111, doi: <https://doi.org/10.1115/PVP2002-1268>.
- [75] B. C. Pinheiro and I. P. Pasqualino, "Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure", *Int. J. Fatigue*, vol. 31, no. 5, pp. 962–973, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.09.006>.
- [76] A. Wöhler, *Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl*. Berlin, Germany: Ernst & Korn, 1870. Accessed: 01.03.2026 [Online]. Available: <https://books.google.at/books?id=VpTKLIX5Wj4C>
- [77] L. F. Coffin, Jr., "A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal", *Trans. ASME*, vol. 76, no. 6, pp. 931–949, 1954, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4015020>.
- [78] S. S. Manson, "Fatigue: A complex subject — some simple approximations", *Exp. Mech.*, vol. 5, no. 7, pp. 193–226, 1965, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02321056>.
- [79] G. R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate", *J. Appl. Mech.*, vol. 24, no. 3, pp. 361–364, 1957, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4011547>.
- [80] P. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws", *J. Basic Eng.*, vol. 85, no. 4, pp. 528–533, 1963, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3656900>.
- [81] J. R. Rice, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks", *J. Appl. Mech.*, vol. 35, no. 2, pp. 379–386, 1968, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3601206>.
- [82] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [83] B. N. Leis, A. Eshraghi, B. Dew, and F. Cheng, "Dent strain and stress analyses and implications concerning API RP 1183 – Part II: Examples of dent geometry and strain analyses during contact and re-rounding", *J. Pipeline Sci. Eng.*, vol. 4, no. 2, p. 100173, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100173>.
- [84] F. Jiang and S. Dong, "Development of an integrated deep learning-based remaining strength assessment model for pipelines with random corrosion defects subjected to internal pressures", *Mar. Struct.*, vol. 96, p. 103637, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103637>.
- [85] A. Ahmed Soomro, A. Akmar Mokhtar, H. B. Hussin, N. Lashari, T. L. Oladosu, S. M. Jameel, and M. Inayat, "Analysis of machine learning models and data sources to forecast burst pressure of petroleum corroded pipelines: A comprehensive review", *Eng. Failure Anal.*, vol. 155, p. 107747, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107747>.
- [86] S. S. Sajjadinia, B. Carpentieri, and G. A. Holzapfel, "A pointwise evaluation metric to visualize errors in machine learning surrogate models", *Front. Artif. Intell. Appl.*, vol. 345, pp. 26–34, 2021, doi: <https://doi.org/10.3233/FAIA210386>.
- [87] M. E. A. Ben Seghier, O. A. Mohamed, and H. Ouaer, "Machine learning-based Shapley additive explanations approach for corroded pipeline failure mode identification", *Structures*, vol. 65, p. 106653, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106653>.
- [88] A. Rachman and R. M. C. Ratnayake, "Machine learning approach for risk-based inspection screening assessment", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 185, pp. 518–532, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.02.008>.
- [89] R. Perera and V. Agrawal, "Multiscale graph neural networks with adaptive mesh refinement for accelerating mesh-based simulations", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 429, p. 117152, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117152>.
- [90] M. Raissi, P. Perdikaris, and G. E. Karniadakis, "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations", *J. Comput. Phys.*, vol. 378, pp. 686–707, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>.
- [91] A. S. Krishnapriyan, A. Gholami, S. Zhe, R. M. Kirby, and M. W. Mahoney, "Characterizing possible failure modes in physics-informed neural networks", *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 34, pp. 26548–26560, 2021, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.01050>.
- [92] P. Borisov and A. Nuchitprasittichai, "Adaptive Latin Hypercube Sampling for a surrogate-based optimization with artificial neural network", *Processes*, vol. 11, no. 11, p. 3232, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/pr11113232>.
- [93] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, and S. Tarantola, "Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index", *Comput. Phys. Commun.*, vol. 181, no. 2, pp. 259–270, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- [94] K. Thaler, R. Schneider, and C. Bucher, "Training data selection for machine learning-enhanced Monte Carlo simulations in structural dynamics", *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 2, p. 581, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12020581>.
- [95] R. A. Babudzhan, O. O. Vodka, and M. I. Shapovalova, "Application of computational intelligence methods for the heterogeneous material stress state evaluation", *Her. Adv. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 198–209, 2022, doi: <https://doi.org/10.15276/hait.05.2022.15>.
- [96] O. V. Choporova and A. O. Lisniak, "The use of a genetic algorithm for optimizing the parameters of the neural network in predicting the stress-strain state of a squared plate", *Appl. Quest. Math. Model.*, vol. 3, no. 2.1, pp. 164–174, 2020, doi: <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.27>.
- [97] M. Azimi, A. D. Eslamlou, and G. Pekcan, "Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review", *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2778, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20102778>.

Надійшла (received) 14.04.2026

Прийнята до друку (accepted) 27.05.2026

Опублікована (published) 29.05.2026

Відомості про авторів та їх внесок / About The Authors And Their Contributions

Роман Онацький (Roman Onatskyi) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків, Україна; тел.: (098) 591-39-30; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6305-8442>; e-mail: roman.onatskyi@infiz.khpi.edu.ua (концептуалізація, методологія, написання тексту)

Сергій Місюра (Serhii Misiura) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків, Україна; тел.: (050) 984-57-15; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5048-1610>; e-mail: serhii.misiura@khpi.edu.ua (написання тексту, рецензування та редагування)

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.