ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

МІЛЕНІН ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.643:621.79:539.42:519.876.5

НАДІЙНІСТЬ ЗВАРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З ВИЯВЛЕНИМИ КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ ПІД ТИСКОМ

05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

Науковий консультант: академік НАН України, д.т.н., проф.,
ЛОБАНОВ Леонід Михайлович,
Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України,
заступник директора.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, д.т.н., проф.,
ФІАЛКО Наталія Михайлівна,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу малої енергетики;

д.т.н., проф.,
КВАСНИЦЬКИЙ Віктор В'ячеславович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри зварювального виробництва;

д.т.н., с.н.с.,
ЧИРКОВ Олександр Юрійович,
Інститут проблем міцності
ім. Г.С. Писаренка НАН України,
провідний науковий співробітник відділу чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності.

Захист відбудеться «22» жовтня 2020 року о 10 – 00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

Автореферат розісланий « 7 » вересня 2020 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01
кандидат технічних наук **Є.В. Шаповалов**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зважаючи на те, що в Україні спостерігається суттєве зношування як магістральних газо- та нафтопроводів, так і технологічних трубопроводів теплових та атомних електростанцій, практично важливою є проблема гарантування їх надійності та роботоздатності. Це зумовлює стійкий інтерес до розробки відповідних розрахункових підходів поряд із впровадженням сучасних технологій відновлення несучої здатності. Сталою світовою тенденцією в цьому напрямку є широке використання засобів математичного і комп'ютерного моделювання взаємопов'язаних багатовимірних фізико-механічних процесів, що визначають настання граничного стану конструкції за різних умов експлуатації. Зокрема, як класичні роботи А. Гурсона, В. Трощенка, А. Красовського так і сучасні розробки Ж. Леметра, Н. Бонори, В. Твергаарда, Б. Марголіна, інш. демонструють всебічні науково-практичні дослідження для найбільш адекватного врахування факту зародження і накопичення пошкодженості матеріалів при чисельному прогнозуванні міцності конструкцій і досягнення ними граничного стану за різних пошкоджуючих факторів, зокрема, корозійно-ерозійного зношування.

Одним із характерних припущень більшості наявних підходів є суттєве спрощення стану металу в області монтажних чи ремонтних зварних швів, які є місцями підвищеного ризику аварійної ситуації. Тому в разі розташування корозійно-ерозійного дефекту в безпосередній близькості до зварного шва відповідні експертні висновки можуть бути недостатньо консервативними чи обґрунтованими, що обмежує застосовність цих підходів для практичних випадків оцінки надійності зварних трубопроводів (посудин тиску). Ця задача ускладнюється при прогнозуванні процесів термодеформування та руйнування металу трубопроводів при ремонтному зварюванні під тиском. В цьому разі окрім власне задачі визначення роботоздатності конструкції після ремонту необхідно гарантувати безпеку проведення робіт. На сьогодні певні спроби побудови такого аналізу проводяться А. Седмаком, В. Брюсом, М. Борингом, Дж. Кіфнером, П. Сабапаті, але їх підходи не розглядають або суттєво спрощують просторово неоднорідні фізико-механічні процеси при зварюванні, що не дозволяє достовірно врахувати вплив ремонтного зварювання на роботоздатність конструкцій. Великий науковий внесок в теорію зварювальних процесів та їх моделювання було зроблено академіком В.І. Махненком, але для врахування особливостей впливу монтажного та ремонтного зварювання на надійність трубопровідних елементів та розв'язання споріднених задач ці методи мають бути розвинені та програмно реалізовані.

Тому розробка методів математичного і комп'ютерного моделювання напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів зварних конструкцій, зокрема, трубопровідних елементів і посудин тиску з виявленими локальними корозійно-ерозійними втратами металу в області зварних швів, в тому числі, за умов ремонтного зварювання, для прогнозування безпеки їх експлуатації не тільки актуальна з практичної точки зору, але і відповідає сучасним тенденціям в фундаментальних наукових дослідженнях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота є фрагментом наукових робіт, що виконувались у відділі математичних методів досліджень фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках бюджетних та госпдоговірних тем, в яких здобувач був науковим керівником, виконавцем або відповідальним виконавцем, зокрема: проект «Прогнозування розвитку в'язкого руйнування трубопроводів в зоні дефектів стоншення стінок за механізмом пороутворення» Цільової програми наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (№ ДР 0113U003496, 2013-2015 рр.); проект «Чисельне прогнозування міцності та роботоздатності зварних трубопровідних систем із виявленими корозійно-ерозійними дефектами» Цільової програми наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (№ ДР 0116U004216, 2016-2020 рр.); тема «Створення системи розрахункових алгоритмів та комп'ютерних програм для дослідження процесів зварювання та споріднених технологій в атомній енергетиці та трубопровідному транспорті» в рамках відомчого замовлення НАН України (№ ДР 0110U002746, 2010-2012 рр.); тема «Створення проблемно-орієнтованої системи розрахункових алгоритмів і комп'ютерних програм для досліджень процесів зварювання, експертизи зварних з'єднань, отримання зливків спецелектрометалургії» в рамках відомчого замовлення НАН України (№ ДР 0113U002024, 2013-2015 рр.); тема «На основі сучасних теорій тріщиноутворення розробити методи прогнозування гарячих і холодних тріщин при зварюванні нових перспективних матеріалів» в рамках відомчої цільової наукової програми ВФТПМ НАН України «Фундаментальні проблеми створення матеріалів з наперед заданими властивостями, методів їх з'єднання і обробки» (№ ДР 0112U001506, 2011-2015 рр.); проект «Оцінка надійності та методи прогнозування залишкового ресурсу зварних алюмінієвих конструкцій» за договором з корпорацією «Spacecraft» (Пекін, КНР) (№ 11GWKJ116-5Y-BD-18, 2013-2015 рр.); проект «Розрахункове визначення роботоздатності трубопроводів дослідного реактора з виявленими несуцільностями в зоні зварних з'єднань» на замовлення ВП «Атоменергомаш» (2013 р.).

Вказані теми відповідають закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», постанові Кабінету міністрів України «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року», постанові Президії НАН України «Про Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України».

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – розробка фундаментальних основ чисельного прогнозування надійності та роботоздатності зварних трубопровідних елементів із виявленими тривимірними дефектами несуцільності металу в контексті гарантування безпеки експлуатації, планування ремонтного зварювання та розв'язання споріднених задач.

Для досягнення мети поставлено наступні **задачі**:

1. Розробка комплексних взаємозалежних моделей розвитку полів температур, напружень, деформацій і докритичного пошкодження металу типових трубопровідних елементів в умовах монтажного та ремонтного зварювання.

2. Розвиток чисельних методів прогнозування зародження та розвитку докритичного пошкодження зварних трубопровідних елементів під дією статичних і циклічних навантажень із урахуванням впливу пластичних деформацій миттєвої пластичності та повзучості металу, у тому числі, після ремонту зварюванням.

3. Розробка критеріїв граничного стану трубопровідних елементів в умовах комплексного впливу зовнішнього силового навантаження й локального зварювального нагрівання з урахуванням особливостей ремонтних робіт на діючих трубопроводах.

4. Реалізація нового покоління проблемно-орієнтованих високопродуктивних програмних засобів комп'ютерного моделювання фізико-механічних процесів при зварюванні та експлуатації зварних конструкцій стосовно типових задач прогнозування граничного стану дефектних зварних трубопроводів і посудин тиску.

5. Побудова ймовірнісних методик оцінки допустимості стану трубопровідних елементів і посудин тиску в умовах експлуатації для чисельної інтерпретації просторово неоднорідного напружено-деформованого стану зварної конструкції та оцінки її схильності до руйнування.

6. Створення багаторівневої методики безперервного ранжирування дефектів, виявлених при технічній діагностиці стану трубопроводів, для ефективної послідовності їх усунення.

7. Дослідження впливу багатопрохідного наплавлення на схильність елементів трубопроводу, що перебувають під внутрішнім тиском, до спонтанного руйнування і на роботоздатність після усунення характерних дефектів локальної втрати металу.

8. Визначення особливостей розвантаження дефектних ділянок трубопроводів за допомогою підсилювальних конструкцій з позиції гарантування ефективності відновлення несучої здатності трубопроводу та забезпечення залишкового ресурсу його безпечної експлуатації.

Об'єкт дослідження – зварні елементи магістральних і технологічних трубопроводів з виявленими тривимірними дефектами несуцільності металу.

Предмет дослідження – особливості граничного стану зварних дефектних трубопроводів і посудин тиску в умовах експлуатації та ремонту, що визначають їх надійність та роботоздатність.

Методи дослідження – математичне та комп'ютерне моделювання багатовимірних взаємопов'язаних фізико-механічних процесів, що супроводжують процес монтажного та ремонтного зварювання типових трубопроводі них елементів і посудин тиску, а також визначають їх граничний стан.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Показано, що в разі близького розташування корозійно-ерозійного пошкодження трубопровідного елемента та зони монтажного чи ремонтного зварювання, граничний стан конструкції визначається формуванням загального поля пористості в'язкого руйнування, що є місцем потенційного зародження макроскопічного дефекту.

2. Визначено, що залишковий напружено-деформований стан в області зварювання трубопроводу викликає локальне збільшення жорсткості напружень (тобто відношення мембранних напружень σ до інтенсивності σ_i) і підвищує схильність металу до накопичення пор в'язкого руйнування відповідно до закону Райса-Трейсі. Найбільший вплив залишкового післязварювального стану типово спостерігається на ранніх етапах пластичного деформування металу під дією експлуатаційного навантаження, тоді як при суттєвому розвитку пластичних деформацій відбувається гомогенізація поля жорсткості напруженого стану.

3. Доведено, що коефіцієнти трипараметричного розподілу Вейбула (коефіцієнт зсуву A_σ, коефіцієнт масштабу B_σ і коефіцієнт форми η_σ), які використовуються для інтегрального статистичного аналізу схильності зварних трубопровідних елементів до руйнування, є функціями механічних властивостей матеріалу, зокрема, їх границі текучості σ_T та напружень пластичного плину σ_{flow}. Для типових трубних сталей коефіцієнт A_σ лежить в діапазоні 400-600 МПа, B_σ – 1000-1900 МПа, $\eta_\sigma \approx 4{,}0$. Для алюмінієвих сплавів системи Al-Mg A_σ приймає значення 200-350 МПа, B_σ – 100-850 МПа, $\eta_\sigma \approx 4{,}0$.

4. Показано, що застосовність типових конструкцій підсилювальних муфт з компаундним наповнювачем обмежена крихкою міцністю кутових зварних з'єднань з неповним проплавленням. Щілина, що формується при цьому, зумовлює невеликий опір зварного вузла спонтанному руйнуванню під дією тиску наповнювача. Запас міцності з'єднання додатково знижується при зменшенні експлуатаційного тиску в трубопроводі, що може призводити до руйнування при плановій зупинці транспортування продукту.

5. Доведено, що максимальна ефективність розвантаження трубопроводу з корозійно-ерозійним ушкодженням композиційним бандажем відповідає достатньо вузькому діапазону експлуатаційного тиску в трубі. Обмежуючим фактором є локальне випинання стінки в області дефекту та локальне руйнування матеріалу бандажу, що ускладнює використання як спрощених інженерних методів прогнозування роботоздатності трубопроводу, так і експериментальних досліджень граничного стану.

6. Показано, що оптимізація багатопрохідного наплавлення локальних корозійних стоншень стінки трубопроводів під тиском має враховувати два основних фактори, а саме: пластичну нестійкість металу при перегріванні металу труби та залишкову деформацію труби після наплавлення, що обмежує її роботоздатність. При цьому, перший фактор превалює при невеликому ремонтному тиску в трубопроводі (до 60 % від проектного значення) та високому тепловкладенні при наплавленні, тоді як другий – при високому тиску (аж до проектного значення) та невеликому тепловкладенні.

Практичне значення одержаних результатів полягає в реалізації методик чисельного прогнозування поточного та граничного стану зварних трубопровідних елементів і посудин тиску з виявленими тривимірними дефектами несуцільності металу. Вони знайшли практичне застосування для планування ремонту зварних швів трубопроводів першого контуру атомних реакторів ВВР-М (ВП «Атоменергомаш»), проектування відповідальних посудин тиску космічного призначення – елементів конструкції модуля орбітальної станції виробництва корпорації «Spacecraft» (КНР), розробки вимог до посудин тиску, отриманих пошаровим формуванням (ПрАТ «НВО«Червона Хвиля»). Проблемно-орієнтоване програмне забезпечення, що базується на розроблених методиках, було включено до переліку програмних кодів, які дозволяється використовувати на об'єктах атомної енергетики України для аналізу технологічної міцності трубопроводів при плануванні монтажного та/або ремонтного зварювання. Актуальність і практична значимість отриманих в роботі результатів стосовно задач забезпечення надійності магістральних трубопроводів підтверджено довідкою АТ «Укртрансгаз».

Обгрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та результатів забезпечується використанням сучасних методів математичного та комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів при зварюванні і експлуатації конструкцій. Верифікація розроблених засобів чисельного прогнозування проводилась на основі результатів власних лабораторних досліджень, а також з використанням визнаних в світі баз експериментальних даних і літературних джерел. Додатково проводилась незалежна верифікація провідними вітчизняними та іноземними компаніями атомної енергетики та аерокосмічного комплексу при промисловому впровадженні.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові розробки та результати, які становлять суть дисертації, отримані здобувачем особисто. У співавторстві здобувачу належать: розробка комплексної методології прогнозування фізико-механічних процесів при монтажному (ремонтному) зварюванні типових трубопровідних елементів та граничного стану конструкцій в різних умовах зовнішнього навантаження з урахуванням зародження та розвитку руйнування матеріалу за в'язким механізмом, їх верифікація, критичний аналіз результатів чисельного моделювання та лабораторних досліджень [9, 11, 13-16, 19, 21, 23, 24, 29-31, 34-38], розробка ймовірнісних методик експертного аналізу результатів діагностики технічного стану трубопроводів і посудин тиску, проведення відповідних розрахунків [2, 4, 5, 12, 20, 32, 33], розробка загальних алгоритмів прогнозування стану конкретних відповідальних конструкцій [7, 8, 17, 28], побудова уніфікованих алгоритмів математичного моделювання граничного стану трубопроводів з виявленою дефектністю в рамках розробки проблемно-орієнтованого програмного забезпечення [1, 3, 18]. Окремі результати спільної роботи [7] увійшли до дисертації Олійника О.І.

Результати дисертації **апробовано** на міжнародних і національних науково-технічних конференціях та семінарах, зокрема: Угорсько-українська об'єднана конференція «Safety-Reliability and Risk of Engineering Plants and Components» (7-8 жовтня 2009 р., Мішкольцтапольца, Угорщина); International

Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics (17-20 червня 2018 р., Пафос, Кіпр, 23-26 червня 2019 р., Корфу, Греція); International Conference on Fracture (18-23 червня 2017 р., Родос, Греція); Міжнародна конференція «Математичне моделювання і інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» (25-28 травня 2010 р., Кацивелі, Україна, 29 травня - 1 червня 2012 р, Кацивелі, 15-19 вересня 2014 р., м. Одеса, 19-23 вересня 2016 р., м. Одеса); Науково-технічний семінар «Забезпечення експлуатаційної надійності систем трубопровідного транспорту» (10-11 червня 2011 р., м. Київ); Науково-технічна конференція «Міцність матеріалів і елементів конструкцій» (28-30 вересня 2010 р., м. Київ); конференція «Неруйнівний контроль в трубопровідному транспорті» (18 квітня 2012 р. м. Київ, 16 жовтня 2013 р., м Київ); Міжнародна науково-технічна конференція «Неруйнівний контроль і технічна діагностика» (20-23 листопада 2012 р., м. Київ); Міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології – сьогодення і майбутнє» (25-26 листопада 2013 р., м. Київ); Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми машинобудування» (20-21 березня 2014 р., м. Москва, РФ); Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (20-23 вересня 2011 р., 17-20 вересня 2013 р., 19-22 вересня 2017 р., м. Тернопіль); Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика» (15-19 травня 2017 р., м. Івано-Франківськ).

Основні результати дисертації **опубліковано** в 43 роботах, з них 3 – в періодичних виданнях, які реферуються в наукометричних базах Scopus та Web of Science, 18 – у виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України, та іноземних періодичних виданнях; 13 – в збірниках праць науково-технічних конференцій та семінарів, 9 – в інших галузевих виданнях.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 429 сторінках машинописного тексту, складається з анотації, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 347 сторінок друкованого тексту (11,36 авторських аркуша). Робота ілюстрована 44 таблицями та 145 рисунками. Список використаних джерел містить 216 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовані її мета та основні задачі, предмет, об’єкт і методи дослідження, відзначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, подана інформація про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації за результатами роботи.

У **першому розділі** представлено критичний аналіз літературних джерел в контексті класичних і сучасних підходів визначення граничного стану та роботоздатності зварних трубопровідних елементів (ТЕ) з виявленими дефектами, та технологічних методів відновлення несучої здатності дефектних конструкцій зварюванням без виводу з експлуатації. Показано загальну

орієнтованість методів аналітичного визначення безпеки експлуатації дефектних трубопроводів на наступний капітальний ремонт (тобто заміну дефектної катушки) та високу консервативність аналізу при врахуванні впливу монтажних зварних швів в області дефектів на граничний стан конструкції. При цьому, якщо підходи по оцінці тріщиноподібних несуцільностей металу є достатньо вичерпними, то методи аналізу допустимості корозійно-ерозійних стоншень ТЕ (Рис. 1), які є одними з найпоширеніших експлуатаційних дефектів, вимагають суттєвого спрощення та не враховують фактичних характеристик опірності матеріалу конструкції відповідним видам руйнування. Це зумовлено складністю просторово неоднорідних фізико-механічних процесів, що визначають граничний стан конкретної конструкції.

Рис. 1. Приклад корозійного пошкодження на поверхні магістрального газопроводу «Новопсков - Аксай - Моздок», Луганське ЛВУМГ

Показано, що більшість наявних підходів визначення допустимості корозійно-ерозійних пошкоджень не можуть бути безпосередньо застосовані для прогнозування технологічної міцності при ремонтному зварюванні трубопроводів, що експлуатуються. Тому необхідною є розробка відповідних узагальнених методик, що можуть бути застосовані на кожному етапі експертного аналізу стану зварних ТЕ і планування ремонтно-відновлювальних робіт.

На основі проведеного критичного аналізу сформульовано задачі дослідження.

У **другому розділі** наведено методологію чисельного прогнозування поточного та граничного стану зварних ТЕ із виявленими корозійно-ерозійними втратами металу в умовах експлуатації та ремонту під тиском. Для аналізу кінетики просторово неоднорідних фізичних, структурних і термомеханічних процесів при зварюванні та подальшій експлуатації зварних конструкцій розроблено і реалізовано комплексні алгоритми математичного моделювання та апробованих засобів чисельної та комп’ютерної реалізації відповідних моделей. Так, кінетика температурного поля при зварюванні визначалася термічним впливом рухомого поверхневого зварювального джерела тепла шляхом чисельного розв’язання нестаціонарного рівняння теплопровідності. Стік тепла в навколишнє середовище враховувався постановкою граничних умов за законами Ньютона і Стефана-Больцмана.

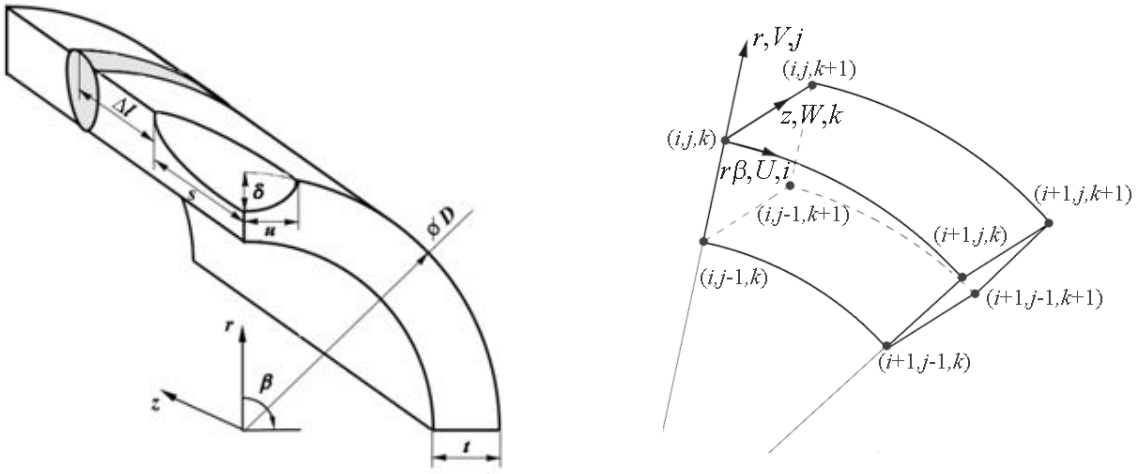
Розрахункову кінетику температурного поля було покладено в основу чисельного простежування розвитку напружено-деформованого (НДС) та пошкодженого станів матеріалу конструкції при зварюванні та подальшій експлуатації. Зародження та розвиток докритичного пошкодження ТЕ визначався в’язким механізмом, який було представлено наступними послідовними етапами: зародження пор в’язкого руйнування при розвиненому пластичному плині металу; збільшення розмірів пор при пластичному деформуванні; взаємодія та об’єднання пор в’язкого руйнування, зародження вторинних пор; зародження макродефекту. Кожний із зазначених етапів має

різну фізико-механічну природу, а тому їхнє описання потребувало розробки відповідних взаємопов'язаних моделей.

Так, зародження пор в'язкого руйнування визначається розвитком пластичного плину металу, тому в якості умови зародження мікропор певної концентрації f_0 було обрано деформаційний критерій в наступній формі:

$$\int \frac{\mathrm{d}\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1, \tag{1}$$

де $\mathrm{d}\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p \mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p}$ – приріст інтенсивності пластичних деформацій; $\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p$ – компоненти тензора приростів пластичних деформацій, $(i, j)=r, \beta, z$ відповідно до схеми на Рис. 2 а; ε_c – критична величина пластичних деформацій.



(а) (б)

Рис. 2. Схеми дефектного трубопроводу з кільцевим зварним швом (а) та скінченного елемента (б) в циліндричній системі координат

Наявність розподіленої несуцільності металу впливає на розвиток НДС конструкції при зовнішньому силовому впливі. Одним із визнаних підходів, які дозволяють врахувати цей фактор, є використання континуальних методів із модифікацією поверхні текучості матеріалу в залежності від об'ємної концентрації рівномірно розподіленої несуцільності. Зокрема, найбільш вживаною є модель Гурсона-Твергаарда-Нідлмана (ГТН), в рамках якої поверхня текучості Ф описується наступним чином:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T}\right)^2 - \left(q_3 f'\right)^2 + 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right) - 1, \tag{2}$$

де q_1, q_2, q_3 – константи; $\sigma = (\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{rr} + \sigma_{zz})/3$ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij}; σ_T – границя текучості матеріалу; f' – еквівалентна концентрація пор, що обчислюється наступним чином:

$$f' = \begin{cases} f, \text{ якщо } f \le f_c \\ f_c + \dfrac{f_w - f_c}{f_F - f_c}\left(f - f_c\right), \text{ якщо } f > f_c \end{cases} \tag{3}$$

де f_c – критичне значення концентрації несуцільності, до якого окремі пори не взаємодіють; f_F – концентрація пор, при якій відбувається макроруйнування певного об'єму; f_w=1/q_1.

Зростання концентрації пор, що зародилися, залежить від жорсткості напруженого стану σ/σ_i, де σ_i – інтенсивність напружень, та інтенсивності пластичних деформацій ε_i^p відповідно до закону Райса-Трейсі в формі:

$$\mathrm{d}f = \begin{cases} 1{,}28\exp\left(\dfrac{3}{2}\dfrac{\sigma}{\sigma_i}\right)\mathrm{d}\varepsilon_i^p, \text{ якщо } \dfrac{\sigma}{\sigma_i} > 1; \\ 1{,}28\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_i}\right)^{1/4}\exp\left(\dfrac{3}{2}\dfrac{\sigma}{\sigma_i}\right)\mathrm{d}\varepsilon_i^p, \text{ якщо } \dfrac{1}{3} \le \dfrac{\sigma}{\sigma_i} \le 1. \end{cases} \tag{4}$$

Розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля, розвитку напружень і деформацій та формування мікропор базується на відповідному скінченно-елементному описі з використанням восьмивузлових скінченних елементів (СЕ) згідно зі схемою на Рис. 2 б. У межах об'єму конкретного елемента приріст тензора деформацій обчислювався як:

$$\mathrm{d}\varepsilon_{ij} = \mathrm{d}\varepsilon_{ij}^e + \mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p + \mathrm{d}\varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij}\left(\mathrm{d}\varepsilon_T + \mathrm{d}f/3\right), \tag{5}$$

де $\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^e$, $\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^p$, $\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^c$, $\delta_{ij}\mathrm{d}\varepsilon_T$, $\delta_{ij}\,\mathrm{d}f/3$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, миттєвою пластичністю, повзучістю, кінетикою неоднорідного температурного поля та пористістю, відповідно; δ_{ij} – символ Кронекера.

Залежність деформацій від напружень визначалася за законом Гука, асоційованим законом пластичного плину та деформуванням високотемпературної повзучості, виходячи з наступного співвідношення:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} = &\left[\Psi + \Omega\left(\sigma_i^*,\ T\right)\Delta\tau\right]\left(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma\right) + \delta_{ij}\left(K\sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f/3\right) - \\ &-\left[\left(2G\right)^{-1} + \Omega\left(\sigma_i^*,\ T\right)\Delta\tau\right]\left(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma\right)^* - \left(K\sigma\right)^*, \end{aligned} \tag{6}$$

де K=(1-2ν)/E – модуль об'ємного стиску; G=0,5E/(1+ν) – модуль зсуву; τ – поточний час; T – поточна температура; символ «*» відносить змінну до попереднього кроку простежування; Ψ – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину відповідно до (2) в рамках ГТН-моделі:

$$\Psi = \frac{1}{2G} + \Omega\left(\sigma_i^*, T\right)\Delta\tau, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T\sqrt{1 + \left(q_3 f'\right)^2 - 2q_1 f'\cosh\left(q_2\frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)};$$

$$\Psi > \frac{1}{2G} + \Omega\left(\sigma_i^*, T\right)\Delta\tau, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s; \tag{7}$$

стан $\sigma_i > \sigma_s$ недопустимий.

Зростання деформації повзучості $\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^c$ за проміжок часу $\mathrm{d}\tau$ описувався за допомогою функції повзучості Ω=Ω(σ_i,T) у такий спосіб:

$$\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^{c} = \Omega\left(\sigma_i, T\right)\left(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma\right)\mathrm{d}\tau\,. \tag{8}$$

На різних етапах деформування повзучість визначається або процесом температурної активації, або рівнем механічних напружень. Тому $\Omega(\sigma_i, T)$ представлялася у вигляді добутку функцій температури Ω_1 і напружень Ω_2:

$$\Omega\left(\sigma_i, T\right) = \Omega_1\left(T\right)\Omega_2\left(\sigma_i\right), \tag{9}$$

де $\Omega_1\left(T\right) = A_c \exp\left[G_c/\left(T+273\right)\right]$, $\Omega_2\left(\sigma_i\right) = \sigma_i^{n_c}$, n_c, A_c, G_c – константи.

Реалізація чисельного простежування згідно з (6) пов'язана з двома нелінійностями в фізичних процесах пластичного деформування та руйнування. Для формального розв'язання цих нелінійних задач були реалізовані відповідні ітераційні алгоритми, які дозволяють визначати стан СЕ, що задовольняє рівнянням рівноваги та умові пластичного плину.

Для прогнозування зародження макроскопічного руйнування запропоновано чисельний критерій крихко-в'язкого руйнування, який полягає у виконанні однієї з трьох умов:

$$\begin{aligned}
&\left(\Psi - \frac{1}{2G}\right)_{cr} \geq \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1{,}5\sigma_s\left(\varepsilon_p, T\right)};\\
&f' \to f_d' = \frac{1}{q_1}\exp\left(-\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right);\\
&\frac{\sigma_1}{1-2f/3} > S_K,
\end{aligned} \tag{10}$$

де S_K – напруження мікровідколу; ε_f – гранична деформаційна здатність матеріалу за критерієм Маккензі.

Таким чином, умови (10) враховують зміну границі текучості металу в процесі пластичного деформування (зміцнення) і докритичного пошкодження. Якщо зазначений процес втрати несучої здатності СЕ відбувається на певному етапі навантаження, охоплюючи все більшу кількість сусідніх елементів, що не дозволяє перейти до наступного кроку навантаження, це визначає граничне навантаження «спонтанного руйнування».

Виходячи з конкретного значення функції Ψ із (7) визначалося поле деформацій на кожному етапі навантаження з урахуванням залежності $\sigma_s(T, \varepsilon^p)$:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \left(\Psi - \frac{1}{2G}\right)\left(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma\right). \tag{11}$$

На кожному кроці ітерації по Ψ напруження σ_{ij} обчислювались наступним чином (за повторюваними індексами відбувається підсумовування):

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi}\left(\Delta\varepsilon_{ij} + \delta_{ij}\frac{\Psi - K}{K}\Delta\varepsilon\right) + J_{ij}\,, \tag{12}$$

де $\Delta\varepsilon=\Delta\varepsilon_{ii}/3$, $b=b_{ii}/3$, $b_{ij}=\left(\frac{\sigma^*_{ij}}{2G}\right)+\delta_{ij}\left[\sigma^*\left(K-\frac{1}{2G}\right)^*-\Delta\varepsilon_T-\Delta f/3\right]$,

$$J_{ij}=\frac{1}{\Psi}\left[\left(b_{ij}-\delta_{ij}b\right)+\delta_{ij}\left(K\sigma^*-\frac{\Delta\varepsilon_T+\Delta f/3}{K}\right)\right].$$

Зв'язок між компонентами тензора деформацій $\Delta\varepsilon_{ij}$ і вектора приросту переміщень ΔU_i має наступний математичний вираз:

$$\Delta\varepsilon_{ij}=\left(\Delta U_{i,j}+\Delta U_{j,i}\right)/2, \qquad (13)$$

де комою позначено диференціювання в межах СЕ.

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянням статики для внутрішніх СЕ і граничним умовам – для поверхневих. У свою чергу, компоненти вектора переміщень ΔU_i = (ΔU, ΔV, ΔW) задовольняють відповідним умовам на границі. Таким чином система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), яка необхідна для розв'язання крайової задачі в компонентах вектора приростів переміщень на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ для певного СЕ, визначалася згідно варіаційного принципу Лагранжа:

$$\frac{\partial Э_l}{\partial\Delta U_{m,n,r}}=0,\ \frac{\partial Э_l}{\partial\Delta V_{m,n,r}}=0,\ \frac{\partial Э_l}{\partial\Delta W_{m,n,r}}=0, \qquad (14)$$

де $Э_l=-\frac{1}{2}\sum_V\left(\sigma_{ij}+J_{ij}\right)\Delta\varepsilon_{ij}V_{m,n,r}+\sum_{S_P}F_i\Delta U_i\Delta S_P^{m,n,r}$; $\sum_V$, $\sum_{S_P}$ – оператори суми по внутрішніх та поверхневих СЕ; F_i – компоненти силового вектора.

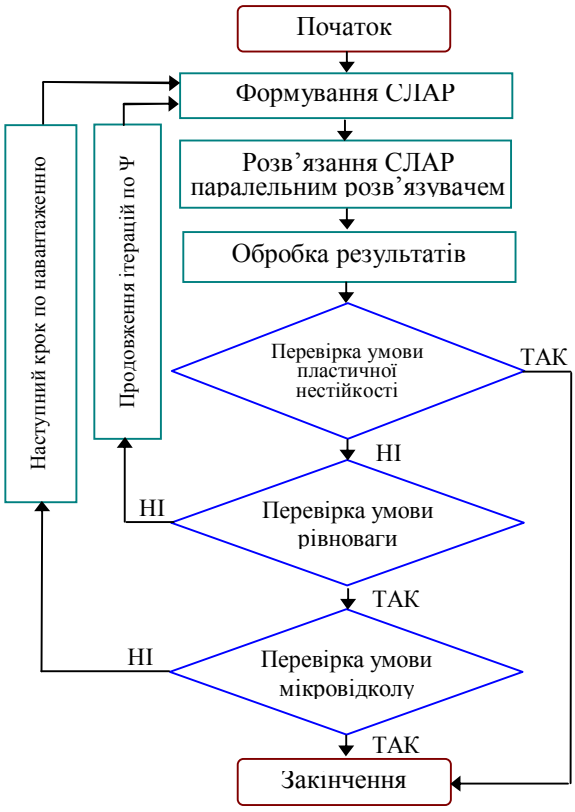


Рис. 3. Схема розв'язання задачі прогнозування стану ТЕ з дефектом стоншення стінки

Для програмної реалізації наведеної методології спільно зі спеціалістами Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України розроблено розрахунковий алгоритм чисельного аналізу, адаптований для реалізації на багатопроцесорних системах різного класу (суперкомп'ютери, кластери, GRID-системи, комп'ютери гібридної архітектури) шляхом паралелізації процесу розв'язання СЛАР, що формується при скінченно-елементній постановці крайових задач (Рис. 3).

Перевірка точності визначення граничного тиску в ТЕ з тривимірними дефектами полягала у порівнянні розрахункового граничного тиску P_{max} в трубах із зовнішніми напівеліптичними дефектами різного розміру, отриманими в рамках чисельного дослідження, з наявними базами експериментальних даних, що широко використовуються,

зокрема, при розробці нормативних документів. Так, для сталевих труб різного класу міцності розрахунки дозволили уточнити вхідні параметри моделей та підтвердити застосовність розроблених підходів для ТЕ різних типорозмірів (Табл. 1). Стосовно алюмінієвих трубопроводів з геометричними аномаліями корозійно-ерозійного типу валідація також проводилася шляхом порівняння результатів чисельного прогнозування граничного тиску в циліндричних зразках зі сплаву АА 6082 з базою даних лабораторних випробувань (Табл. 2). Як показують результати порівняння розрахункових і експериментальних даних, похибка чисельного прогнозування не перевищує 10 %, що для більшості практичних задач є достатнім.

Було проведено комплекс чисельних досліджень характерних особливостей розвитку докритичного пошкодження металу зварних ТЕ з урахуванням експлуатаційної дефектності корозійно-ерозійного типу. Зокрема, на характерному прикладі дефектного ТЕ зі сталі Х65 з товщиною стінки t = 20 мм і діаметром D = 1420 мм досліджено вплив кільцевого зварного з'єднання на поточний і граничний стан конструкції під дією внутрішнього тиску P. Показано, що взаємне розташування зварного шва (з урахуванням залишкового НДС і накопиченого в процесі зварювання пошкодження) і концентратора напружень в області геометричної аномалії впливає як на особливості докритичного руйнування металу конструкції, так і на величину граничного тиску P_{max}. При цьому на початкових етапах навантаження конструкції внутрішнім тиском пошкодження розвивається незалежно в області максимальної глибини дефекту і в зоні термічного впливу (ЗТВ) шва (Рис. 4). Характерною особливістю граничного стану конструкції є виражена взаємодія між двома видами розглянутих неоднорідностей, яка характеризується об'єднанням полів пористості в'язкого руйнування (Рис. 4 г).

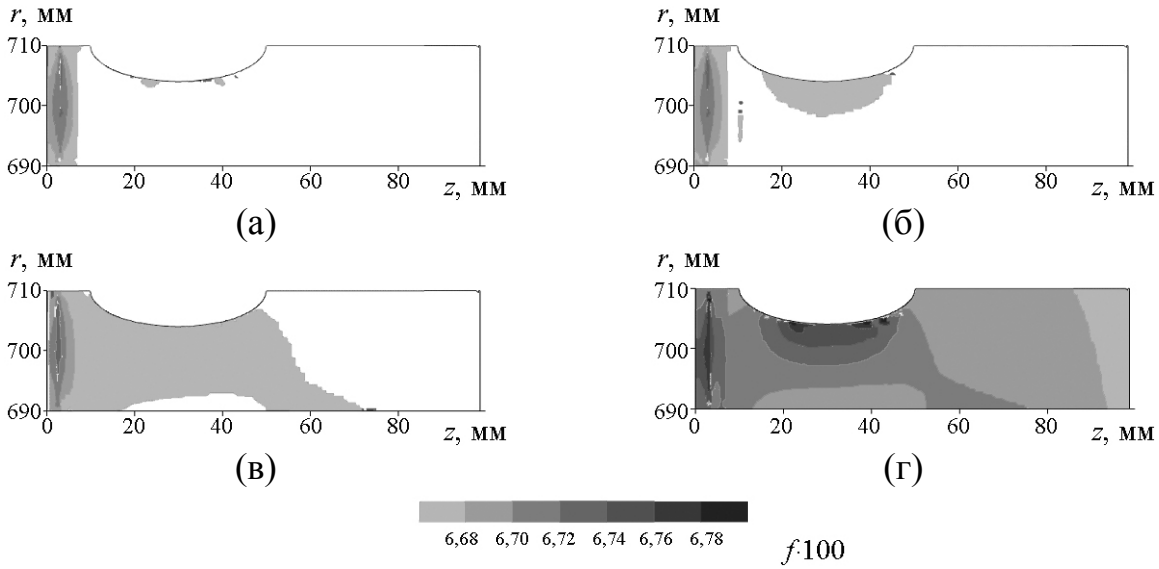


Рис. 4. Поле пористості в'язкого руйнування в стінці трубопроводу ($D\times t$=1420×20 мм) з дефектом втрати металу ($2s\times 2u\times\delta$=40×40×5 мм) за різного внутрішнього тиску P: а – 16,5 МПа, б – 17,0 МПа, в – 17,5 МПа, г – 20 МПа
Примітка: тут і на Рис. 5 вісь 0r є віссю симетрії кільцевого зварного шва

Таблиця 1. Порівняння результатів чисельних розрахунків граничного тиску P_{max} в дефектних трубопровідних елементах з результатами експериментальних випробувань P_{exp} з міжнародних баз даних (сталеві труби різного класу міцності)

t, мм	D, мм	δ, мм	$2s$, мм	$2u$, мм	σ_T, МПа	Клас міцності	P_{exp}, МПа	P_{max}, МПа	Похибка, %
4,83	275	2,11	157,5	43,1	350,6	X42	12,62	13,80	9,35
5,00	274	2,16	124,5	43,1	350,6	X42	13,35	14,15	5,99
4,93	274	1,60	45,7	43,0	350,6	X42	14,99	16,40	9,41
4,88	273	2,18	101,6	42,9	350,6	X42	15,18	14,15	6,79
8,64	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	24,44	25,15	2,91
8,64	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	24,52	25,15	2,57
8,53	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	25,01	25,15	0,56
8,51	324	0,00	0,0	0,0	356,4	X46	25,06	25,15	0,36
9,37	864	4,62	91,4	135,7	356,4	X46	9,17	8,35	8,94
9,47	864	3,00	185,4	135,7	356,4	X46	10,56	11,20	6,06
8,43	324	0,00	0,00	0,00	356,4	X46	23,27	25,15	8,08
8,74	324	0,00	0,00	0,00	356,4	X46	23,92	25,25	5,56
8,61	324	3,30	144,8	50,8	356,4	X46	23,93	22,60	5,56
8,64	323	2,16	63,5	50,8	356,4	X46	24,37	26,50	8,74
8,64	323	2,69	61,0	50,8	356,4	X46	25,23	25,20	0,12
5,26	273	1,73	139,7	42,9	402,5	X52	18,06	17,75	1,72
5,74	507	3,02	132,1	79,6	462,3	X55	10,73	10,25	4,47
17,50	762	8,75	200,0	50,0	464,5	X65	9,17	8,35	8,94
17,50	762	8,75	200,0	100,0	464,5	X65	10,56	11,20	6,06
17,50	762	4,38	200,0	50,0	464,5	X65	10,73	10,25	4,47

Таблиця 2. Порівняння результатів чисельних розрахунків граничного тиску P_{max} в дефектних трубопровідних елементах з результатами експериментальних випробувань P_{exp} (алюмінієві трубні зразки зі сплаву AA 6082)

t, мм	D, мм	δ, мм	$2s$, мм	$2u$, мм	P_{exp}, МПа	P_{max}, МПа	Похибка, %
3,18	145,54	1,60	38,15	9,53	10,55	10,5	0,47
3,25	145,69	1,68	38,05	38,05	13,17	11,9	9,64
2,85	145,90	0,51	40,23	10,11	14,82	14,5	2,16
2,85	142,85	2,01	38,20	10,01	7,24	7,30	0,83
3,15	137,87	2,41	12,14	3,99	14,48	13,2	8,84
3,12	137,82	2,54	6,12	9,65	15,69	16,6	5,80
3,12	137,82	2,26	59,64	10,26	6,55	6,50	0,76
3,15	137,87	2,39	12,32	363,50	8,96	9,40	4,91
6,23	145,69	5,36	53,49	9,83	11,72	11,6	1,02
6,25	145,59	4,70	13,77	9,78	22,75	24,1	5,93

Слід зазначити, що чим більша відстань між зварним швом і поверхневою втратою металу Δl, тим більший силовий вплив необхідний для підвищення локальних напружень, зародження великого об'єму пошкодження металу між ними та формування області потенційного зародження макроруйнування (Рис. 5). Як видно з наведених даних, близьке розташування дефекту стоншення до монтажного зварного шва може знизити несучу здатність трубопроводу до 7 %. Ця залежність (Рис. 6) обмежена консервативним значенням умовної відстані між дефектом і зварним швом $L_{msd} = 1{,}8\sqrt{D(t-\delta)} \approx 220$ мм, що відповідає нормативним вимогам.

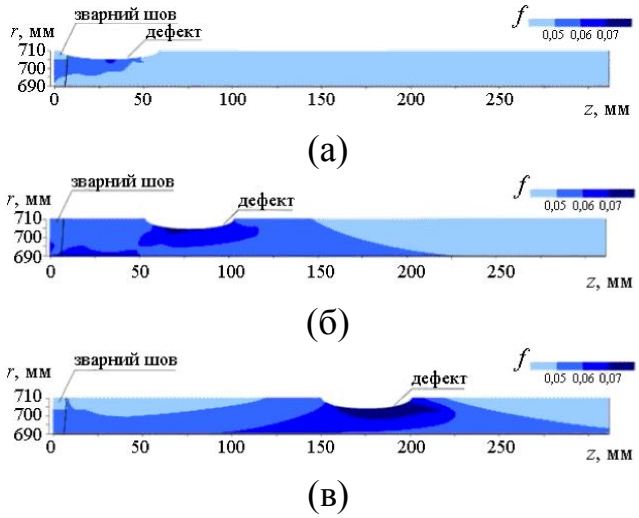


Рис. 5 Поле концентрації пор f в перерізі труби ($D \times t$=1420×20 мм) за граничного тиску P_{max} залежно від відстані Δl між зварним швом і дефектом: а – Δl = 5мм, P_{max} = 18,8 МПа; б – Δl = 50 мм, P_{max} = 19,8 МПа; в – Δl = 150 мм, P_{max} = 20,2 МПа

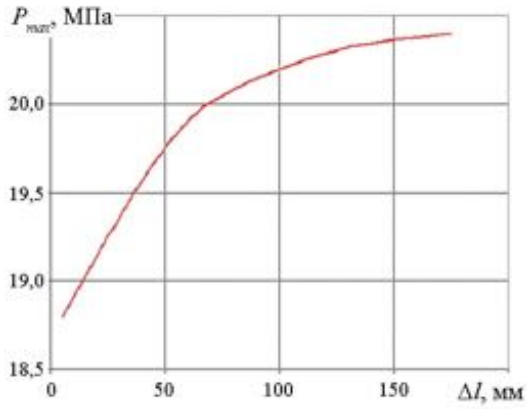
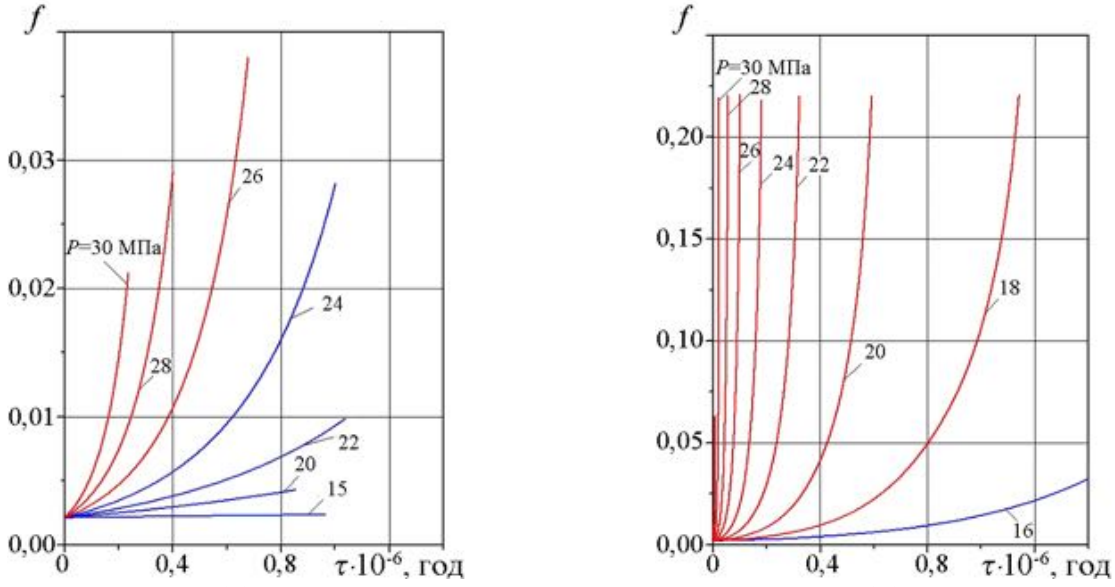


Рис. 6. Розрахункова залежність граничного тиску P_{max} в трубопроводі $D \times t$=1420×20 мм) від відстані між дефектом стоншення і кільцевим зварним швом Δl

Сучасною тенденцією при експлуатації генеруючих установок електростанцій є максимальне збільшення тиску та температури теплоносія. Але для температур від 550 до 650 °С і вище процеси повзучості типових матеріалів трубопроводів і посудин тиску суттєво впливають на їх тривалу міцність, особливо, у випадку концентрації напружень в області геометричних аномалій або конструктивних неоднорідностей. Як приклад такого впливу була розглянута ділянка трубопроводу з неіржавної сталі 10ГН2МФА ($D \times t$=300×15 мм) з кільцевим монтажним зварним швом для двох характерних варіантів стану: бездефектний випадок і при наявності в області кільцевого шва ерозійного дефекту локального стоншення. Розрахунок розвитку пористості в умовах статичного навантаження внутрішнім тиском показав типову кінетику збільшення об'ємної концентрації несуцільності f (Рис. 7 а), яка відповідає наявним у літературі даним вимірювань засобами акустичної емісії. При цьому, зростання внутрішнього тиску від 15 до 30 МПа суттєво змінює час настання граничного стану $\tau_к$, який зменшується більше, ніж у три рази в результаті більш інтенсивного пластичним деформуванням за механізмом повзучості.



(а) (б)

Рис. 7. Залежність об'ємної концентрації пор в'язкого руйнування f від часу експлуатації τ ТЕ ($D\times t$=300×15 мм, 10ГН2МФА) для бездефектного випадку (а) і за наявності дефекту локального стоншення ($2s\times 2u\times\delta$=100×50×5 мм) (б) при різних значеннях внутрішнього тиску P і температурі 650 °С

Наявність дефекту локального стоншення розміром $2s\times 2u\times\delta$= 100×50×5 мм зумовлює зростання інтенсивності накопичення пошкодження в результаті формування концентратора напружень та відповідного збільшення деформацій повзучості (Рис. 7 б). При цьому, концентрація граничного пошкодження f бездефектного ТЕ характерно нижча, ніж для дефектного. Це пояснюється локальністю руйнування: труба без вираженого концентратора напружень одержує практично рівномірне по всьому перерізі пошкодження (за винятком області зварного з'єднання), тому граничний стан має місце при більшому тиску, але при меншому максимальному f.

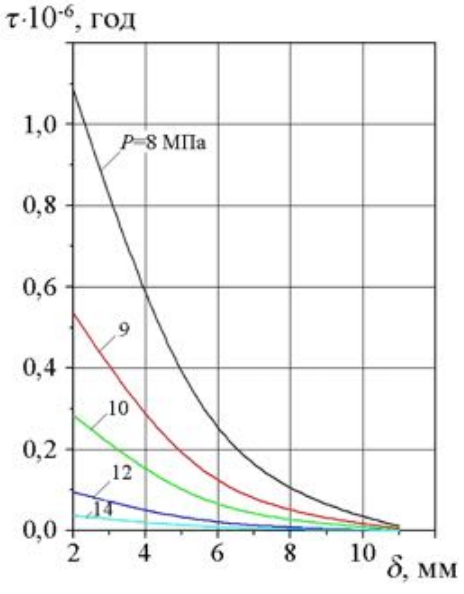


Рис. 8. Залежності часу до руйнування ТЕ $\tau_к$ від глибини дефекту стоншення δ в області монтажного шва при різних значеннях внутрішнього тиску P ($2s$=30 мм, температура 650 °С)

Стосовно зварних ТЕ з виявленими дефектами стоншення стінки розроблений підхід дозволяє з невеликою консервативністю оцінювати час високотемпературної експлуатації з урахуванням параметрів опору матеріалу руйнуванню та розміру дефекту. Так, для зазначеного вище випадку ТЕ зі сталі 10ГН2МФА розмір дефекту суттєво впливає на граничний час експлуатації $\tau_к$ (Рис. 8): залежно від внутрішнього тиску P величина $\tau_к$ може зменшуватись на кілька порядків при збільшенні глибини дефекту з 2 до 11 мм ($2s$ = 30 мм, температура 650 °С).

У **третьому розділі** наведено методологію ймовірнісного аналізу фактичного стану та роботоздатності зварних ТЕ з виявленими корозійно-ерозійними пошкодженнями. Приймалося, що ймовірнісний характер зародження та розвитку руйнування пов'язаний з особливостями невизначеності фактичних характеристик опірності руйнуванню в мікро- та макромасштабі. Стосовно трубопроводів і посудин тиску ймовірність руйнування в умовах експлуатації визначалась за розрахунковим полем головних напружень у рамках статистичної теорії міцності Вейбула для реалізації описання руйнування за механізмом «слабкої ланки». У цьому випадку передбачалося, що в межах СЕ ймовірність руйнування описується трипараметричною функцією Вейбула, тому інтегрування поля напружень в площині найбільш слабкого поперечного перерізу S дозволяє оцінити сумарну ймовірність руйнування ТЕ:

$$p = 1 - \exp\left[-\int_S \left(\frac{\sigma_1 - A_\sigma}{B_\sigma} \right)^{\eta_\sigma} \frac{\mathrm{d}S}{S_0} \right], \left(\sigma_1 > A_\sigma \right) \qquad (15)$$

де σ_1 – головні напруження в конкретному СЕ; A_σ, B_σ, η_σ – параметри Вейбула, S_0 – параметр масштабного фактору.

Точність кількісної імовірнісної оцінки згідно з (15) залежить від адекватності використовуваних значень параметрів Вейбула конкретній задачі. В даній роботі визначення величин A_σ, B_σ, η_σ базувалося на статистичних чисельних дослідженнях граничного стану ТЕ з різних матеріалів і з дефектами різного розміру. Для спрощення проведення досліджень було прийнято низку припущень. Так, параметр зсуву A_σ характеризує можливість руйнування СЕ при відносно невеликих напруженнях, тому передбачалося, що імовірнісний характер руйнування проявляється при напруженнях, що перевищують напруження пластичного плину $\sigma_{flow} = (\sigma_B + \sigma_T)/2$, де σ_B – границя міцності. Відповідно до існуючого досвіду, параметр форми η_σ для описання руйнування конструкційних матеріалів приймає значення 3-4. Таким чином, необхідно було визначити значення параметра масштабу B_σ розподілу Вейбула (15) залежно від властивостей матеріалу труби. Статистична обробка результатів прогнозування граничного стану труб різного типорозміру та з різними дефектами стоншення розв'язанням оберненої задачі дозволила отримати значення B_σ для сталей різного класу міцності (Рис. 9) та підтвердити те припущення, що коефіцієнти Вейбула є функціями властивостей матеріалу.

Для низки практично важливих випадків експлуатаційного пошкодження технологічних трубопроводів у вигляді тривимірних несуцільностей в металі зварного шва оцінка ймовірності руйнування у формі (16) може бути некоректною. Зокрема, це відноситься до високотемпературної експлуатації ТЕ, яка супроводжується інтенсивним пластичним плином за розвиненої повзучості. При цьому не спостерігається значного зростання напружень, більше того, залишкові післязварювальні напруження можуть суттєво знижуватися за механізмом високого відпуску. Тому інтегрування поля головних напружень у рамках статистики Вейбула не відображає накопичення необоротних деформацій, яке може призвести до зародження і розвитку

докритичного пошкодження, зниження несучої здатності трубопроводу та його макроскопічного руйнування.

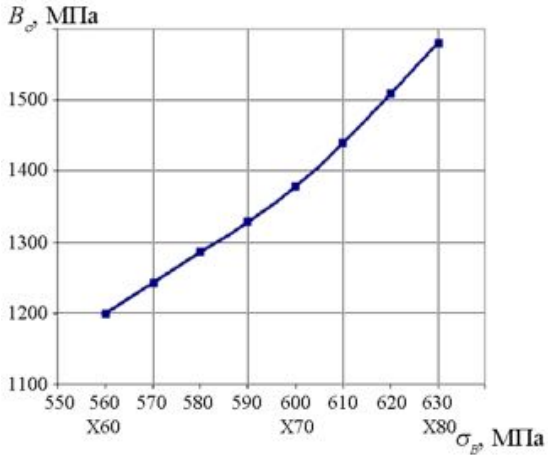


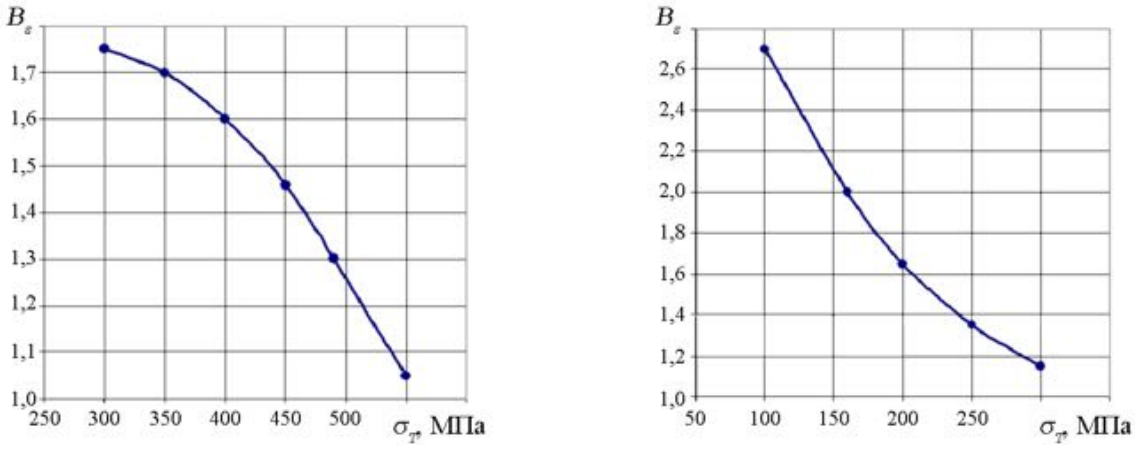
Рис. 9. Залежність параметра Вейбула B_σ від границі міцності (класу міцності) сталі ТЕ

Тому було запропоновано альтернативний метод оцінки ймовірності руйнування зварних ТЕ в умовах інтенсивного пластичного деформування металу, оснований на інтегруванні поля інтенсивності деформацій ε_i :

$$p = 1 - \exp\left[-\int_S \left(\frac{\varepsilon_i - A_\varepsilon}{B_\varepsilon} \right)^{\eta_\varepsilon} \frac{\mathrm{d}S}{S_0} \right], \left(\varepsilon_i > A_\varepsilon\right), \quad (16)$$

де A_ε, B_ε, η_ε – параметри Вейбула.

Передбачалося, що ненульова ймовірність руйнування з'являється на початку макроскопічного пластичного деформування, тобто $A_\varepsilon \approx 0{,}887 \cdot \sigma_T / E$. У свою чергу, η_ε складає близько 5, тому метою аналізу полів деформацій в дефектній трубі під граничним тиском є визначення параметрів B_ε розподілу Вейбула (16) залежно від властивостей матеріалу. Аналогічним шляхом було отримано консервативні значення параметрів Вейбула B_ε, як функції від границі текучості σ_T трубних сталей (Рис. 10 а) і алюмінієвих сплавів різної міцності (Рис. 10 б), що незначно залежать від розміру дефекту та типорозміру труб.

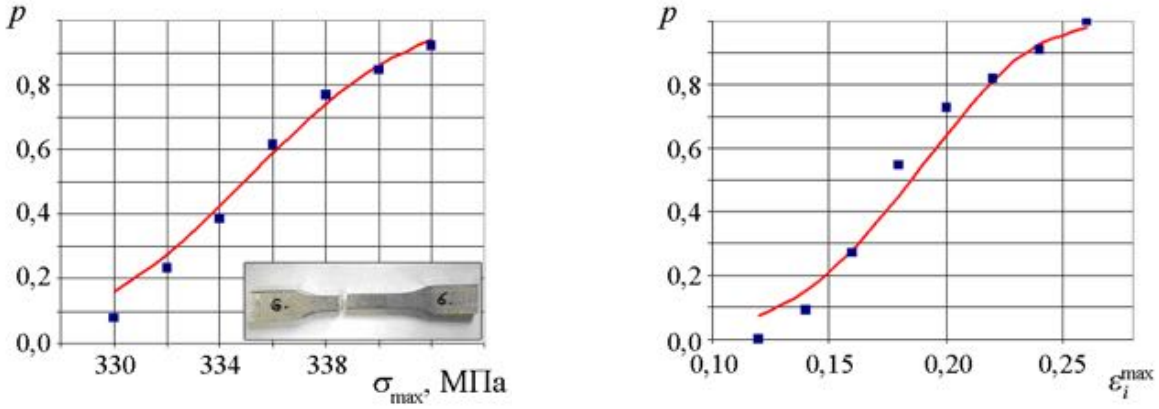


(а) (б)

Рис. 10. Залежності параметра Вейбула B_ε від границі текучості σ_T матеріалу дефектної ділянки трубопроводу: а – сталь; б – сплави на основі алюмінію

Для верифікації отриманих коефіцієнтів Вейбула було проведено статистичні лабораторні випробування по одновісному навантаженню 12 зварних зразків з алюмінієвого сплаву АМг6. Результати випробувань показали відчутне розсіювання статичної міцності зразків, але розподіл відповідає функції Вейбула, що було доведено критерієм достовірності Колмогорова-Смирнова. Як показано на Рис. 11, σ-процедура (A_σ = 318 МПа, B_σ = 360 МПа, η_σ = 4,0) добре корелює з експериментальними даними (рівень значущості тесту α близько 0,5), тоді як ε-процедура (A_ε = 0,004, B_ε = 1,98, η_ε = 5,0)

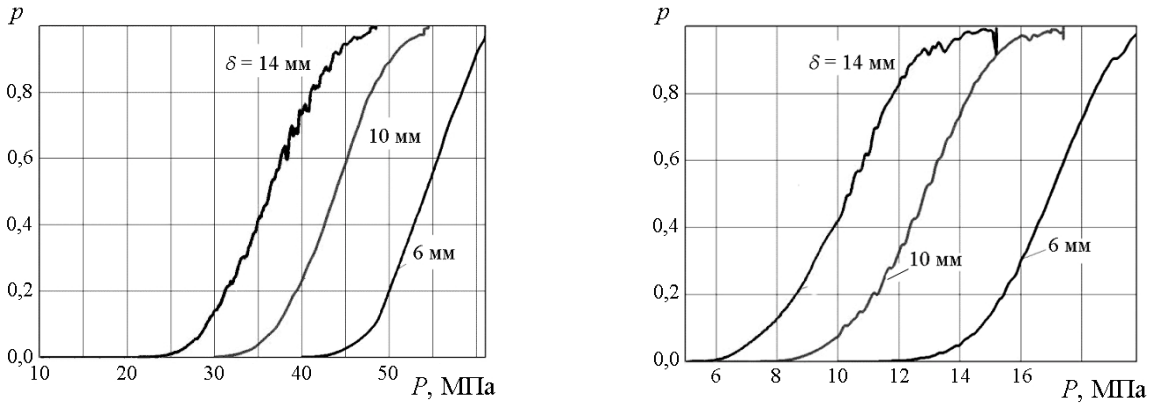
характеризується гіршою, проте задовільною відповідністю (α = 0,05). Також за допомогою зварних зразків різної товщини було експериментально отримано параметр масштабного фактору S_0=0,25 мм^2.



(а) (б)

Рис. 11. Порівняння результатів статистичної лабораторної перевірки ймовірності руйнування алюмінієвих зразків (■) залежно від граничних головних напружень σ_{max} (а) та інтенсивності деформації $\varepsilon_i^{\max}$ (б) з чисельним прогнозуванням відповідно до розроблених моделей (▬)

На основі отриманих даних реалізовано універсальну методику ймовірнісної інтерпретації розрахункових полів напружень та деформацій в перерізі дефектних трубопроводів. Зокрема, товстостінні ТЕ мають суттєво тривимірний розподіл НДС в області дефектів стоншення, тому раціональним є використання методів скінченно-елементного аналізу НДС і докритичного руйнування, що не вимагають наближення пружних або пласких моделей. Як приклад, на Рис. 12 а наведено залежності ймовірності руйнування від внутрішнього тиску до граничних навантажень для трубопроводу $D\times t$ = 800×39 мм зі сталі Х80 з дефектами різної глибини ($2s\times 2u$=150×40 мм). Для характерних діапазонів експлуатаційних навантажень ТЕ до 22 МПа величина ймовірності руйнування не перевищує $4\cdot 10^{-4}$, що допустимо для типових трубопровідних систем з погляду сумарного ризику аварійної ситуації.



(а) (б)

Рис. 12. Залежність імовірності руйнування трубопроводу з дефектами стоншення стінки різної глибини від внутрішнього тиску: а – $D\times t$= 800×39 мм, сталь Х80; б – $D\times t$ = 1420×25 мм, сталь Х60

Для ТЕ іншого типорозміру ($D \times t$ = 1420×25 мм) зі сталі Х60 аналогічні дефекти мають більш істотний вплив на несучу здатність конструкції (Рис. 12 б): дефекти з глибиною 10 і 14 мм недопустимі для характерного робочого внутрішнього тиску (до 11 МПа), тому що ймовірність руйнування становить більше ніж 0,2 і 0,6, відповідно; для ділянки трубопроводу з дефектом глибиною 6 мм імовірність аварійної ситуації становить $5{,}1 \cdot 10^{-4}$, що, у більшості випадків, є прийнятним.

Ймовірнісні методики оцінки граничного стану дефектних ТЕ використовуються не тільки для прогнозування їх роботоздатності, але і для експертного аналізу результатів технічної діагностики. Типовою задачею при плануванні ремонтно-відновлювальних робіт, зокрема, на протяжних ділянках магістральних трубопроводів (МТ) є ранжирування виявлених при внутрішньотрубній діагностиці (ВТД) дефектів для визначення раціонального порядку їх усунення. Раніше фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було запропоновано методику імовірнісного ранжирування дефектів, але вона потребувала подальшого розвитку для відповідності національним нормативними вимогам, розширення типів аналізованих дефектів, а також для врахування множинної дефектності, яка може бути усунена за один етапу ремонту. Тому в рамках даної роботи реалізовано удосконалену методику ранжирування залежно від повноти наявних даних і необхідної консервативності. Вона складається з трьох рівнів:

Рівень 1. Поділ усіх дефектів на 4 групи за ступенем допустимості (незначні, помірні, значні, критичні).

Рівень 2. Визначення залишкового коефіцієнта запасу міцності ділянки МТ із конкретним виявленим дефектом.

Рівень 3. Розрахунок імовірності руйнування стінки трубопроводу в області дефекту та на ділянках шурфу з групою ізольованих дефектів.

Приймалось, що ймовірнісна природа руйнування дефектного ТЕ зумовлена неточністю дефектоскопії, а також природним розкидом даних про властивості матеріалу. Тому для визначення ймовірності аварійної ситуації використовувалася методика, заснована на методі Монте-Карло, а саме:

– на основі відомих вхідних даних за кожним виявленим дефектом визначалася їхня репрезентативна вибірка в рамках відповідних законів розподілу. Під репрезентативною вибіркою малась на увазі кількість рівноймовірнісних комбінацій N_S, достатня для стабільної розрахункової ймовірності руйнування згідно з детермінованим критерієм граничного стану;

– у рамках репрезентативної вибірки проводився підрахунок кількості недопустимих станів N_i ТЕ з конкретним дефектом на основі відповідного детермінованого критерію. Під імовірністю аварійної ситуації p_i в області дефекту приймалася частота виконання умови граничного стану:

$$p_i = N_i / N_S \,. \tag{17}$$

– за необхідності визначалася сумарна ймовірність аварійної ситуації p_Σ на ділянці трубопроводу з кількома ізольованими дефектами:

$$p_\Sigma = 1 - \prod_i \left(1 - p_i\right). \tag{18}$$

Залежно від виду конкретного вхідного параметра розподіл його значень описувався різними статистичними функціями. Так, стосовно описання геометричних розмірів конструкції (дефекту), міцнісних характеристик матеріалу (σ_T, σ_B), швидкості корозії, використовувався усічений нормальний закон розподілу, для параметрів тріщиностійкості – закон Вейбула.

Розроблена методика ранжирування була апробована як на прикладі модельних дефектів різного розміру, так і за результатами діагностики стану ділянки магістрального газопроводу «Уренгой-Центр 2», характерні результати яких наведено в Таблицях 3-4. Було доведено ефективність безперервного ранжирування великої кількості виявлених дефектів у порівнянні з підрозділом на групи за ступенем небезпеки, в разі якщо велика кількість дефектів потрапляє в кожну з груп.

Таблиця 3. Характеристики дефектів локального стоншення стінки магістрального газопроводу «Уренгой-Центр 2»

№ дефекту	$2s$, мм	$2u$, мм	t_{min}, мм
1	330	200	16
2	210	200	16,8
3	350	350	15,7
4	400	350	15,1
5	380	460	15,5

Таблиця 4. Імовірність руйнування (пріоритет ремонту) дефектних ділянок у процесі експлуатації магістрального газопроводу «Уренгой-Центр 2»

№ дефекту	Час експлуатації, років				
	0	0,5	1,0	1,5	2
1	0,0 (2)	0,00025 (4)	0,0055 (4)	0,052 (4)	0,179 (4)
2	0,0 (2)	0,0 (5)	0,0015 (5)	0,0142 (5)	0,063 (5)
3	0,0 (2)	0,00125 (3)	0,026 (3)	0,131 (3)	0,338 (3)
4	0,0041 (1)	0,0562 (1)	0,240 (1)	0,490 (1)	0,758 (1)
5	0,0 (2)	0,007 (2)	0,0715 (2)	0,263 (2)	0,494 (2)

У четвертому розділі розглянуто особливості багатопрохідного наплавлення стінки трубопроводу, яке дозволяє відновити габаритні розміри стінки зі стоншенням (корозійно-ерозійним або зумовленим контрольованим шліфуванням) шляхом компенсації втраченого металу. З огляду на важливість гарантування безпеки проведення зварювальних робіт на діючому трубопроводі основну увагу було приділено питанню визначення граничного стану ТЕ. Оскільки попереднє підігрівання області ремонту дозволяє уникнути холодного розтріскування, то основним механізмом, що обмежує технологічну міцність, є пластична нестійкість локально перегрітого металу навантаженої внутрішнім тиском труби. Іншим аспектом, що обмежує застосовність наплавлення виявлених дефектів стоншення стінки ТЕ, який перебуває під внутрішнім тиском, є надлишкове деформування конструкції в області локального послаблення, викликаного нагріванням. Як результат, в області наплавлення

дефекту стоншення утворюється дефект форми типу випину (здуття). Таким чином, усунення втрати металу може знизити міцність і роботоздатність ділянки ТЕ у випадку недопустимої залишкової формозміни труби. Оптимальним режимом заварювання дефекту є такий, при якому внутрішні усадкові зусилля в перерізі трубопроводу врівноважуються надлишковим радіальним зусиллям в області послабленого металу, в результаті чого залишкова формозміна ТЕ після заварювання допустима.

Існує низка розрахункових процедур оптимізації параметрів тепловкладення при зварюванні на діючих трубопроводах, зокрема, критерій Баттеля, що розглядає максимально допустиму температуру на внутрішній поверхні трубопроводу $T_{in.KP}$, і критерій 46345, згідно з яким у процесі ремонту ТЕ має одержати надлишкове радіальне деформування не більше критичного значення dr_{KP}. Використання параметрів $T_{in.KP}$ і dr_{KP} звужує застосовність зазначених критеріїв, тоді як моделювання на основі формальних законів термомеханіки та фактичних характеристик опірності матеріалу руйнуванню в рамках розроблених в цій роботі підходів дозволило обгрунтовано знизити консервативність чисельного аналізу.

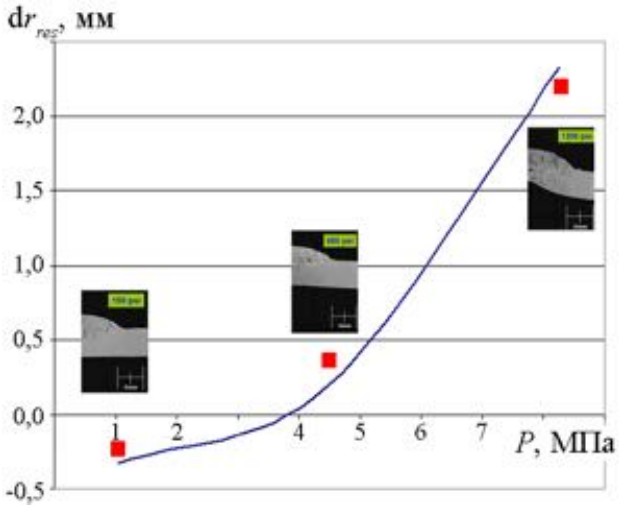


Рис. 13. Порівняння розрахункових максимальних значень залишкових радіальних деформацій dr_{res} стінки циліндричного зразка після наплавлення одного валика з наявними експериментальними даними (W. Bruce)

Стосовно процесу наплавлення на ТЕ під тиском запропоновані комплексні моделі були верифіковані на основі наявних даних, отриманих В. Брюсом, щодо НДС модельних лабораторних трубних зразків ($D \times t = 219 \times 3{,}2$ мм, матеріал – сталь API 5L) при різних значеннях внутрішнього тиску (P_r = 1,03-8,27 МПа) при наплавленні на них кільцевих валиків. За результатами порівняння величини максимального залишкового радіального переміщення стінки модельної труби dr_{res}, отриманого в рамках цих експериментальних робіт, з даними розрахунків, було зроблено висновок про задовільну точність розроблених математичних моделей розрахунку НДС стосовно розглянутого комплексу завдань ремонтного наплавлення (Рис. 13).

Дослідження особливостей стану ТЕ з зовнішнім дефектом корозійного стоншення стінки в процесі ремонтного наплавлення проводилося на характерному прикладі трубопроводу $D \times t = 1420 \times 20$ мм зі сталі Х65 (σ_T = 490 МПа, σ_B = 590 МПа) з максимальним експлуатаційним тиском P = 7,4 МПа. Був розглянутий дефект втрати металу ($2s \times 2u \times \delta$=70×70×10 мм) на зовнішній поверхні труби. Для усунення такого дефекту достатньо двох наплавлювальних шарів (за винятком контурного), схема розкладання валиків

представлена на Рис. 14. Передбачалося, що область ремонту попередньо підігрівалась до температури $T_{пр}$ = 100 °С, щоб уникнути появи холодних тріщин, технологічні параметри дугового наплавлення згідно з рекомендованими існуючими стандартами наступні: зварювальний струм I = 80 А, швидкість зварювання $v_{св}$=2 мм/с, тиск у трубопроводі при ремонті P_r = 4 МПа. Додатковим параметром ремонту є максимальна температура при охолодженні металу перед накладанням наступного валику $T_{пп}$.

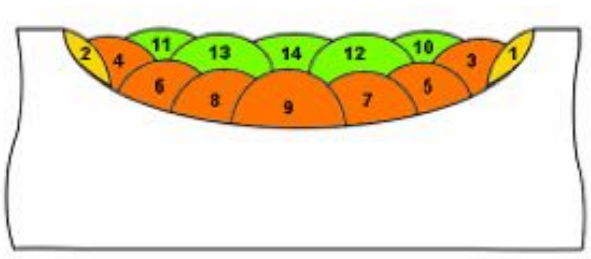


Рис. 14. Типова схема розкладання валиків при багатопрохідному наплавленні напівеліптичного дефекту стоншення на зовнішній поверхні ТЕ

Розрахунок залишкового НДС конструкції після наплавлення показав суттєво неоднорідний просторовий розподіл залишкових напружень (приклад результатів розрахунку поля залишкових окружних напружень $\sigma_{\beta\beta}$ наведено на Рис. 15). Це пояснюється поступовою формозміною труби по мірі наплавлення валиків, а також складними температурними циклами області ремонту, що характеризуються повторним нагріванням і охолодженням.

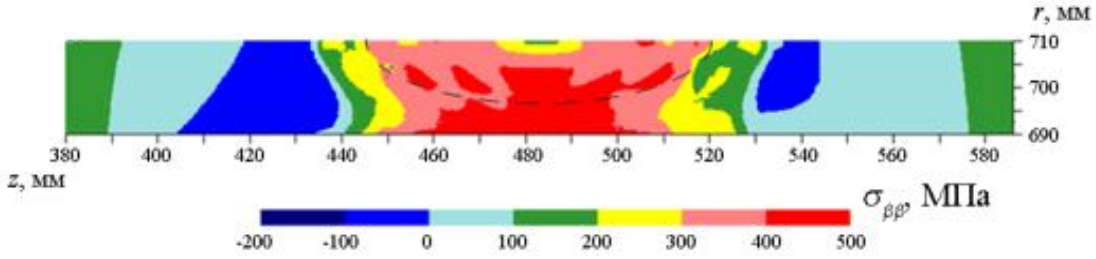


Рис. 15. Розподіл залишкових окружних напружень $\sigma_{\beta\beta}$ у перерізі стінки МТ після багатопрохідного наплавлення на зовнішній дефект локального стоншення (пунктиром позначено контур усуненого дефекту)

Використання чисельних методик, що включають прогнозування розвитку деформованого стану конструкції в процесі ремонтного наплавлення аж до залишкового стану, який характеризується надлишковим радіальним переміщенням dr_{res}, дозволило враховувати фактор появи дефекту форми. Допустимість такого дефекту визначалася розрахунком трубопроводу на статичну міцність згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 (коефіцієнт запасу міцності n дефектного ТЕ не має бути менше допустимого значення k). На прикладі декількох режимів наплавлення дефекту згідно зі схемою Рис. 14 проведено чисельне дослідження допустимості поточного та залишкового стану ТЕ (Табл. 5) та виявлено неприпустимі режими ремонту. Більш повно такі дані можуть бути представлені у вигляді двовимірних діаграм, зокрема, у координатах «ремонтний тиск - зварювальний струм», приклад яких для розглянутого випадку наведений на Рис. 16. Криві на наведених діаграмах є границею, що розділяє області допустимого і недопустимого станів трубопроводу при багатопрохідному наплавленні та наступній експлуатації:

область параметрів, що розташована нижче кривих 1, відповідає виконанню вимог допустимості дефекту форми в області ремонту, тоді як область під кривою 2 – параметрам, що гарантують виконання критеріїв опору матеріалу в'язкому руйнуванню. Із цих даних зроблено висновок про те, що при істотному тепловкладенні переважаючим механізмом, що обмежує застосування наплавлення, є пластична нестійкість, тоді як при відносно невеликих потужностях нагрівання і високих тисках небезпечним є надлишкове деформування конструкції

Таблиця. 5. Вплив технологічних параметрів ремонтного наплавлення на граничний і залишковий стани трубопроводу

№	P_r, МПа	I, А	T_{nn}, °С	Висновок про допустимість
1	4,0	80	300	наплавлення допустиме
2	4,0	100	300	наплавлення допустиме
3	4,0	100	500	наплавлення допустиме
4	7,5	150	500	дефект форми, що утворювався після наплавлення, помірний, $1{,}593 = n < k = 1{,}617$
5	7,5	170	500	пластична нестійкість

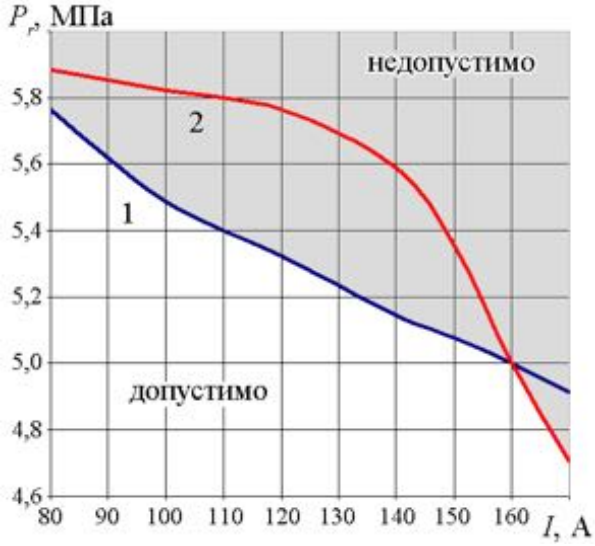


Рис. 16. I-P-діаграма вибору режимів багатопрохідного наплавлення з урахуванням допустимості залишкового дефекту форми 1 і критеріїв пластичної нестійкості 2: $T_{nn} = 100$ °С

П'ятий розділ присвячено задачі прогнозування ефективності відновлення несучої здатності елементів трубопровідних систем за допомогою підсилювальних конструкцій (ПК) різного типу: зварні металеві муфти, композиційні бандажі (КБ), муфти з компаундними наповнювачами. Ефективність розвантаження дефектного ТЕ є багатофакторною характеристикою та включає як технологічні аспекти проведення ремонтних робіт (зокрема, ступінь прилягання ПК до стінки труби, початковий контактний тиск при попередньому натягові ремонтної конструкції, тиск рідкого наповнювача, т. ін.), так і геометричні особливості дефекту (форма, глибина, поверхня розміщення). Такі особливості стану контактної пари «ПК - дефектний ТЕ» складно прогнозувати на основі спрощених моделей будівельної механіки, тому раціональним є застосування скінченно-елементного підходу описання напружено-деформованого та граничного станів конструкції. Крім того необхідно формалізувати поняття «ефективність» у контексті аналізу схильності досліджуваної ділянки трубопроводу до руйнування за результатами розрахунку полів напружень (деформацій). На

основі реалізованих в рамках даної роботи імовірнісних підходів було запропоновано кількісне визначення ефективності ремонту трубопроводу *EPB* з виявленим дефектом локального стоншення:

$$EPB = 1 - p_I / p_Z , \qquad (19)$$

де p_Z, p_I – імовірність порушення цілісності трубопроводу з виявленими дефектами, відповідно, до та після ремонту за допомогою ПК.

Формула (19), фактично, дозволяє розрахувати ступінь зниження ймовірності руйнування ТЕ в результаті ремонту. Використання такого підходу спільно з відповідними скінченно-елементними дослідженнями дозволило кількісно оцінити вплив основних технологічних параметрів ремонту дефектних ділянок трубопроводів за допомогою ПК різного типу. Як приклад застосування розробленої методики для аналізу ефективності розвантаження ТЕ ($D \times t$=1420×20 мм, Х60, P=7,4 МПа) з внутрішнім напівеліптичним дефектом $2s \times 2u$=200×50 мм, підсиленого зварним бандажем з товщиною стінки t_M=20 мм, було проведено розрахунок імовірності руйнування при збільшенні глибини дефекту від 10 до 19 мм (що еквівалентне корозійному зростанню у процесі наступної експлуатації). Як показано на Рис. 17, збільшення δ викликає нелінійне зростання ймовірності руйнування ТЕ. При цьому, встановлення бандажа у випадку дефектів невеликої глибини дозволяє суттєво знизити ймовірність руйнування, проте при формуванні течі відбувається різке збільшення схильності до спонтанного руйнування, кількісно описується відповідним зниженням *EPB*.

На Рис. 18 наведені результати кількісної оцінки впливу величини тиску P на ефективність *EPB* розвантаження ТЕ з внутрішніми дефектами стоншення різної форми (напівеліптичної, конічної, циліндричної, $2s \times 2u \times \delta$= 100×100×17 мм) за допомогою бандажу (t_M=20 мм, P_r=2,0 МПа). Так, різний розподіл контактного тиску в області аномалії викликає відповідну зміну ефективності розвантаження дефектної ділянки на різних етапах навантаження, що має враховуватись при виборі ремонтного тиску P_r та товщини ПК.

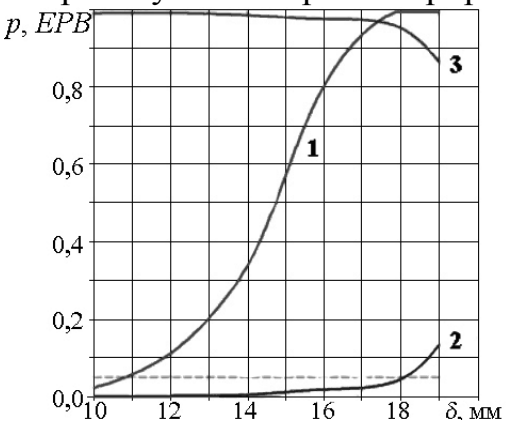


Рис. 17. Залежності ймовірності руйнування ТЕ із внутрішнім напівеліптичним дефектом від глибини δ без ремонту (1) і з підсилювальним бандажем (2), а також відповідна величина ефективності ремонту *EPB* (3)

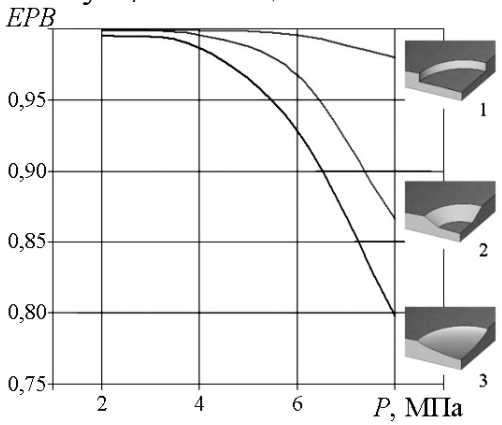
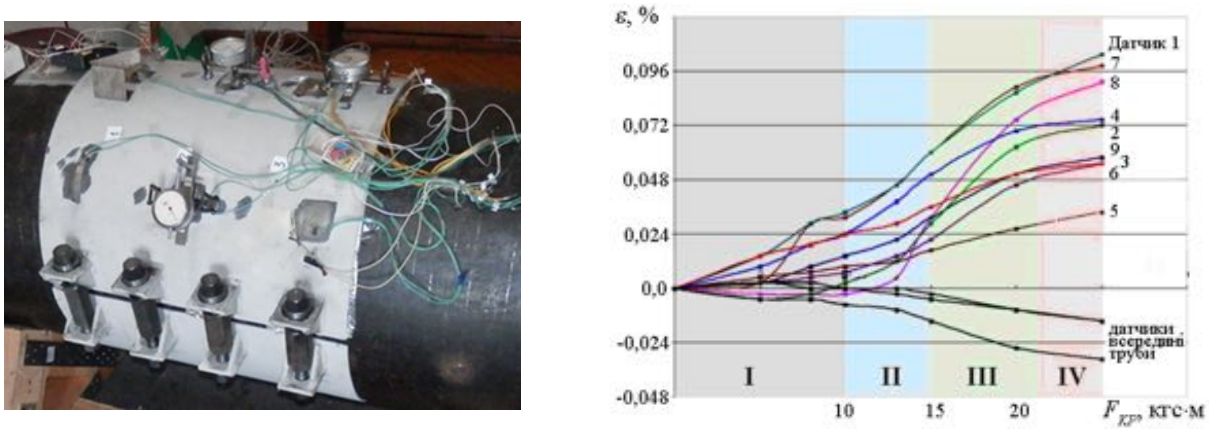


Рис. 18. Залежність ефективності *EPB* ремонту дефектної ділянки МТ за допомогою підсилювального бандажа від тиску P: циліндричний (1), конічний (2) та еліптичний (3) дефекти

Особливості формування контактного тиску при натягу в процесі монтажу ПК складно описати в рамках математичних моделей, тому вони досліджувались на основі лабораторних досліджень установлення типового бандажа на елемент трубопроводу ($D \times t$=530×7 мм) за допомогою болтового натягу (Рис. 19 а). Використовувались бандажі з різною товщиною стінки (t_M=3-7 мм), інструментальний контроль стану ПК проводився на основі показань системи тензодатчиків ПКБ20, зусилля крутіння, що прикладається на болтовому вузлі, вимірювалося динамометричним ключем.



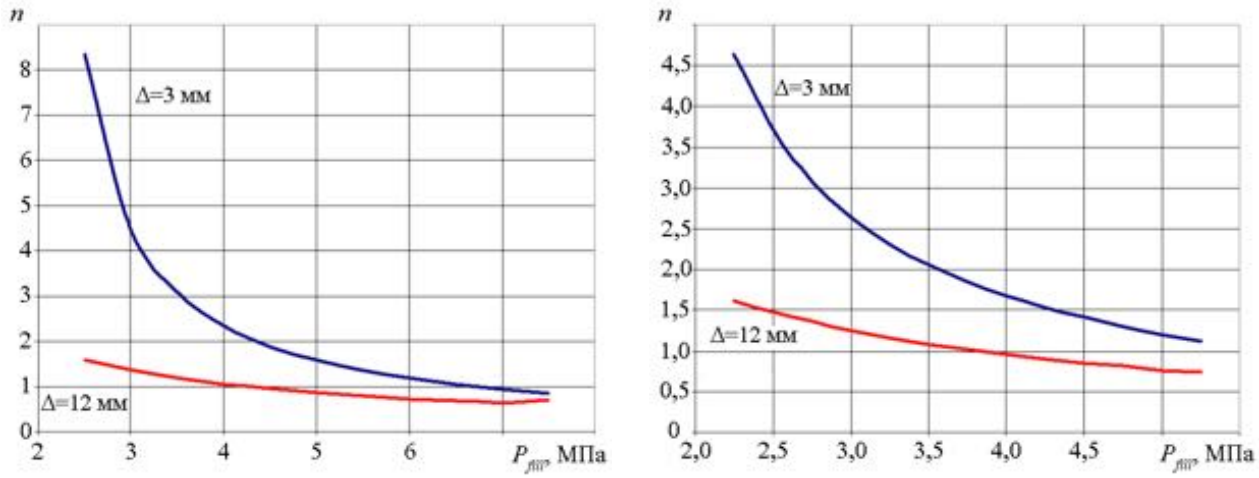
(а) (б)

Рис. 19. Зовнішній вигляд лабораторного стенду для дослідження монтажу підсилюючих конструкцій на елемент трубопроводу (а) та приклад показань системи тензодатчиків залежно від поточного крутильного моменту на болтовому вузлі (б)

На Рис. 19 б наведені характерні виміряні залежності розвитку деформацій згідно з показаннями тензодатчиків від величини крутильного моменту F_{KP}, що прикладається до болтів при натягу. Як видно із цих даних, розподіл деформацій є досить неоднорідним за площею бандажа, але можна виділити характерні етапи процесу навантаження, такі як: вибірка зазорів між ПК і ТЕ, згинальне деформування конструкцій як безмоментних оболонок до відповідності форм їх поперечного перерізу (I); формування механічного прилягання поверхонь у контактній парі (II); пружний перерозподіл напружень між стінками бандажа й труби при збільшенні зусилля механічного натягу (III); вичерпання жорсткості болтового вузла (IV). Найбільш ефективною є ділянка пружного розвантаження, де робота контактної пари підкоряється лінійним законам, а перерозподіл окружних напружень між стінками бандажа й труби відбувається пропорційно співвідношенню їх товщин. Проте максимальне значення розвантаження ТЕ за допомогою ПК різних товщин, не перевищує 0,25-0,30 МПа, що не є суттєвим з точки зору загального ефекту ремонту, але важливо для забезпечення якісного прилягання конструкцій і перерозподілу навантаження при збільшенні тиску в трубі з ремонтного рівня до проектного.

Природна обмеженість можливостей механічного натягу при монтажі ПК зумовлює практичний інтерес до герметичних муфт з компаундними твердіючими наповнювачами. Принцип використання такої ремонтної

конструкції полягає в заповненні регулярної міжстінкової щілини між муфтою та трубопроводом рідким компаундом, що дозволяє забезпечити відповідний рівень гідростатичного тиску та знизити рівень напружень у стінці дефектного ТЕ. Проте ремонт за допомогою таких муфт має свої обмеження, які пов'язані з особливостями монтажу ПК на трубі, а саме з низькою міцністю зварного з'єднання. За наявності технологічного кільця, що забезпечує необхідну величину проміжку між стінками, у зоні примикання утворюється тріщиноподібна щілина, тому розрахунок граничного тиску наповнювача виконувався на основі підходів механіки руйнування тіл із тріщинами, а саме методом R6, що базується на двопараметричному критерії крихко-в'язкого руйнування. Проведені розрахунки показали (Рис. 20), що при нормативних розмірах муфти та відповідних умовах заповнення міжстінкового проміжку розміром Δ рекомендовано тиск наповнювача на рівні $[P_{fill}]$ = 4,3-4,5 МПа при P_r= 5,25-7,5 МПа і Δ = 3мм. Збільшення Δ до 12 мм різко знижує допустимий тиск наповнювача до 1,7-2,3 МПа. Оскільки для багатьох практично реалізованих випадків величина проміжку Δ складає близько 3 мм, допустимий тиск P_{fill} не має перевищувати 4 МПа.



(а) (б)

Рис. 20. Залежність коефіцієнта запасу міцності *n* зварного з'єднання герметичної муфти і ТЕ ($D \times t$=1420×20 мм, σ_T = 440 МПа) залежно від тиску рідкого наповнювача P_{fill} при різних величинах міжстінкового проміжку Δ:
а – P=7,5 МПа; б – P=5,25 МПа

Одним із сучасних методів відновлення несучої здатності трубопроводів з виявленими неглибокими корозійними-ерозійними пошкодженнями є підсилення бандажами з композиційних матеріалів (КМ). Це дозволяє ефективно розвантажувати ТЕ, при цьому, трудомісткість і фінансові витрати на ремонт такими ПК суттєво менші, ніж у випадку використання металевих бандажів. Розрахунки підсиленої труби на статичну міцність потребували розробки взаємозалежних моделей розвитку НДС та докритичного пошкодження при досягненні граничних навантажень від внутрішнього тиску. В цій роботі було реалізовано алгоритм дворівневого аналізу стану КБ, установленого на ТЕ з дефектами, у рамках якого спочатку розв'язувалася

задача прогнозування НДС (макрорівень), потім для кожного СЕ визначався ступінь пошкодження в припущенні регулярності структури кожної з комірок КМ (мезорівень). Зв'язок між рівнями реалізовувався передачею певних розрахункових даних на кожному етапі чисельного простежування (Рис. 21).

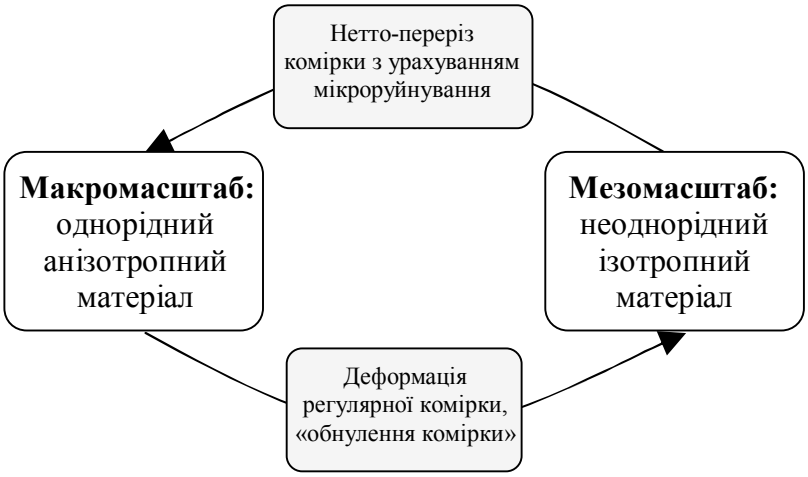


Рис. 21. Блок-схема розрахункової моделі стану композиційного матеріалу при зовнішньому навантаженні

Так, розв'язанням задачі пружно-пластичного деформування циліндричної конструкції, що складається з металевого трубопроводу з локальними напівеліптичними аномаліями геометрії поверхні (дефектами корозійно-ерозійної втрати металу) і шару анізотропного КМ, у рамках макроскопічного аналізу визначалося поле переміщень вузлів скінченно-елементного розбиття. Крім того, при певному значенні істинних напружень (деформацій) у СЕ відбувається його руйнування, що математично описувалося «обнуленням» елемента (виведенням його з розрахунку) та відповідним розв'язанням рівняння пружно-пластичного та пошкодженого станів для виконання умов рівноваги (14) та оцінки перерозподілу напружень і деформацій. Поле переміщень вузлів композиційної частини конструкції передавалося як гранична умова при розв'язанні задачі НДС регулярних комірок у рамках мезозадачі в неоднорідній ізотропній постановці. У цьому випадку, кожний СЕ представлявся суперпозицією матриці й армуючого компоненту з відповідними властивостями та власним (більш дрібним) скінченно-елементним розбиттям. Відповідно до поля напружень у кожній регулярній комірці оцінювалося її пошкодження шляхом аналогічного «обнулення» СЕ матриці або армуючого компоненту, яке визначає несучий нетто-переріз елемента при розв'язанні макрозадачі на наступному етапі простежування. Таким чином, розроблена дворівнева методика оцінки НДС системи «трубопровід - КБ» дозволила враховувати як зовнішній силовий вплив на систему, так і розвиток руйнування в КМ і в металі труби аж до настання граничного стану за (10) та критерієм Хофмана.

Для верифікації результатів розроблених моделей стосовно задач оцінки граничного стану ТЕ з дефектом локального стоншення стінки після підсилення КБ (скловолоконний композит із епоксидною смолою в якості матриці) були використані літературні протокольні дані лабораторних випробувань труб діаметром 530 та 720 мм і показано точність розрахунків на рівні 10-12 %.

Використання наведеної методики було розглянуто в рамках наступного характерного прикладу: на трубопровід $D \times t$=530 ×11,4 мм зі сталі Х65, на зовнішній поверхні якого виявлено 6 дефектів локального стоншення

довжиною $2s \times 2u = 150 \times 70$ мм і глибиною δ=3-7 мм, рівномірно розподілених по окружності труби, установлено КБ зі склотканини (Е-Скло, 7 шарів) з матрицею з епоксидної смоли, товщина бандажа – t_M=4 мм. На основі розрахунку *EPB* було показано, що при збільшенні внутрішнього тиску ефективність розвантаження поступово знижується, що відповідає накопиченню пошкодження в КМ. При досить високих значеннях P спостерігається стрибкоподібне зниження *EPB*, що пояснюється руйнуванням армуючих волокон та істотним зниженням несучої здатності КБ (Рис. 22). Також показано, що більша глибина дефектів веде до меншого докритичного пошкодження, що передує руйнуванню КМ: менша залишкова товщина стінки ТЕ викликає надмірне локальне випинання в області дефекту, в результаті чого руйнування бандажа при високих внутрішніх тисках більш локалізоване.

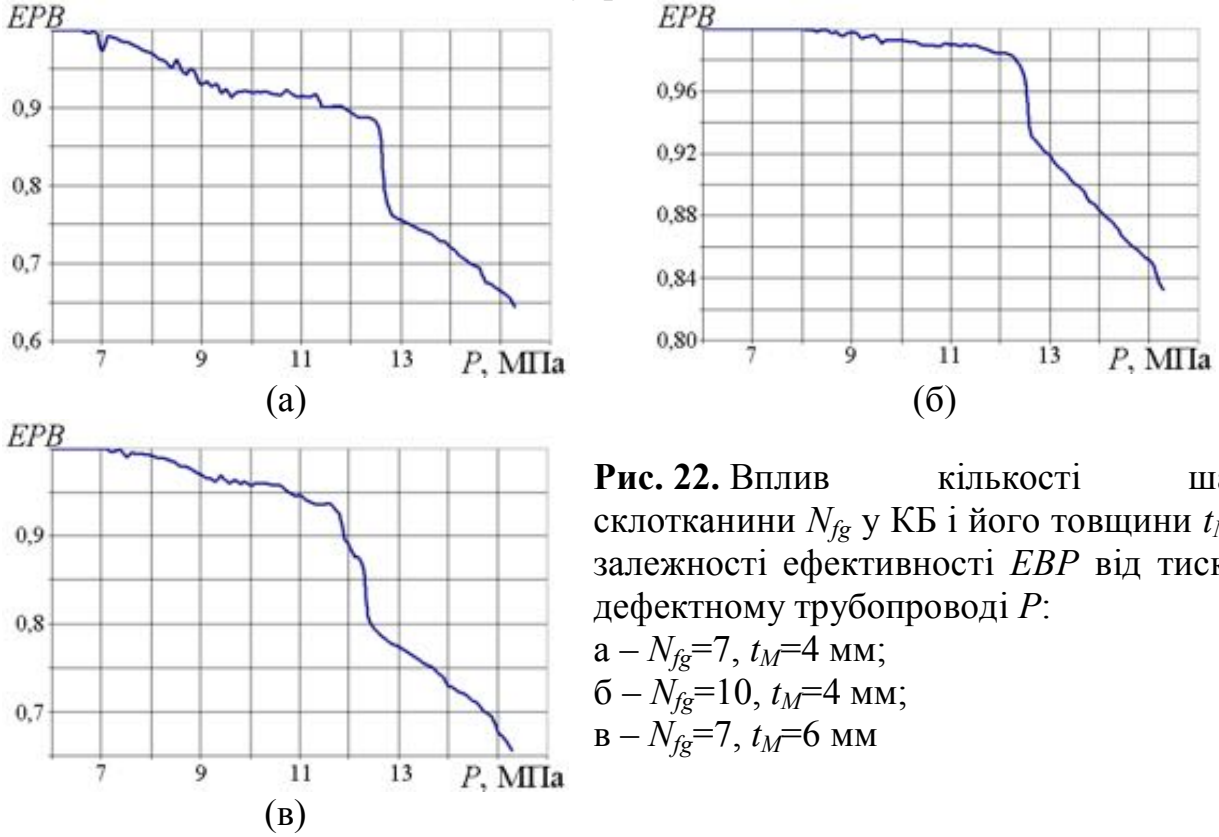


Рис. 22. Вплив кількості шарів склотканини N_{fg} у КБ і його товщини t_M на залежності ефективності *EBP* від тиску в дефектному трубопроводі P:
а – N_{fg}=7, t_M=4 мм;
б – N_{fg}=10, t_M=4 мм;
в – N_{fg}=7, t_M=6 мм

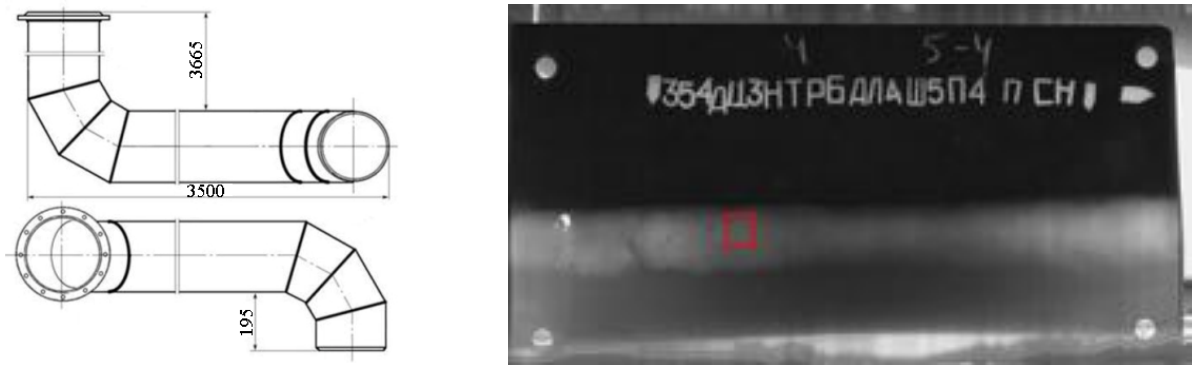
Для практичного застосування викладеної методики зручно розглядати умовний внутрішній тиск у трубі P_{EPB}, який відповідає певній величині ефективності підсилення КБ. Це дозволяє оптимізувати розглянутий метод ремонту, виходячи з проектного діапазону експлуатаційних тисків на певній ділянці трубопроводу. Так, у рамках чисельного дослідження впливу товщини бандажа та кількості шарів склотканини в ньому на ефективність розвантаження дефектного ТЕ (δ=5 мм), показано, що при однаковій товщині бандажа, але більшій кількості шарів скловолокна, так само як і при збільшенні товщини підсилюючого шару КМ, локальний перерозподіл напружень в області дефекту обумовлює зростання

Таблиця 6. Вплив кількості шарів склотканини N_{fg} і товщини бандажа t_M на величину умовного тиску $P_{0,95}$

N_{fg}	t_M, мм	$P_{0,95}$, МПа
7	4	8,4
10	4	13,3
7	6	10,8

EPB. Це можна кількісно описати збільшенням умовного тиску $P_{0,95}$, що відповідає *EPB*=0,95, як це показано в Табл. 6. Як видно з цих результатів, збільшення шарів склотканини (і відповідна зміна властивостей КБ) дозволяє суттєво збільшити ефективність ремонту підсиленням (у розглянутому випадку, більш ніж на 60 %) навіть при збереженні загальної товщини бандажа.

У **шостому розділі** представлено результати практичної реалізації та промислового застосування основних результатів досліджень. Зокрема, розроблені методи отримали дослідно-виробниче впровадження на *ВП «Атоменергомаш»* для планування ремонту зварних ТЕ першого контуру дослідницького атомного реактора ВВР-М (Рис. 23 а) з алюмінієвого сплаву АМг3. В процесі виготовлення вказаних зварних ТЕ було допущено формування множинної газової пористості в металі зварних швів (Рис. 23 б), яка не дозволяла використовувати трубопровід за призначенням, тому необхідним було локальне механічне вибирання дефектного металу та ремонтне наплавлення. Для цього було проаналізовано результати неруйнівного контролю стану ТЕ та визначено місця локального ремонту. Так, проектні умови експлуатації трубопроводу ($D\times t$=350×10 мм, P≤0,15 МПа, тиск при гідровипробуваннях $P_в$=0,32 МПа, температура T≤50ºС) та властивості матеріалу з коефіцієнтами запасу відповідно до ПНАЕ Г-7-002-86 (R_m^T=254 МПа, n_m=2,6, $R_{p0,2}^T$ = 70 МПа, $n_{0,2}$=1,5, [σ] =47 МПа) показали надлишкову міцність конструкції: товщина стінки більше ніж в 5 разів перевищувала мінімальну допустиму величину [t]=1,25 мм. Це дозволило розглядати певне зниження несучої здатності ТЕ з дефектами зварних швів.



(а) (б)

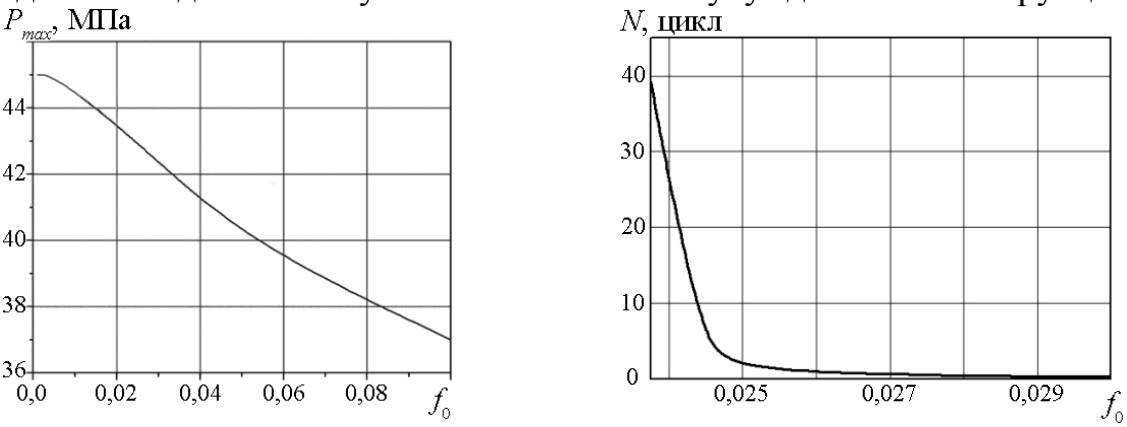
Рис. 23. Схема ТЕ першого контуру атомного реактора ВВР-М (а) та рентгенограма ділянки зварного шва з множинною газовою пористістю (б)

Як показали результати досліджень, важливим фактором при визначенні допустимості множинних газових включень є їх взаємне розташування та близькість до вільної поверхні конструкції. Так, якщо група пор розташовується близько до поверхні конструкції (ця відстань приблизно дорівнює характерному розміру дефекту), або відстань між порами не перебільшує розміру найбільшого з дефектів, це призводить до суттєвого зниження граничного тиску в порівнянні з бездефектним станом (15-23 %). При цьому основна небезпека полягає у формуванні локалізованих ділянок

докритичного руйнування, які є потенційними зародками тріщиноподібних дефектів і становлять високу небезпеку цілісності ТЕ в полі залишкових та експлуатаційних напружень. На основі проведених розрахунків за наданими результатами дефектоскопії було виділено небезпечні групи дефектів зварних швів, які були усунені ремонтним наплавленням.

Рис. 24. Зовнішній вигляд типової посудини тиску в процесі виготовлення за допомогою технології багатошарового наплавлення xBeam 3D Metal Printer

Стосовно типових конструкційних елементів і посудин тиску (Рис. 24), одержуваних методами пошарового формування за допомогою технології xBeam 3D Metal Printer (*ПрАТ «НВО «Червона Хвиля»*) сформульовано вимоги до суцільності металу. Одним із характерних недоліків використання адитивних технологій є можлива наявність розподіленої пористості в області сплавлення шарів. Тому важливо визначення впливу такого роду дефектності на роботоздатність отриманої шляхом наплавлення конструкції в умовах статичного та змінного статичного навантаження. Було досліджено граничний стан циліндричної посудини ($D \times t$ = 300×2,5 мм) під дією внутрішнього тиску з метою визначення впливу локальної розподіленої пористості на роботоздатність. Так, на Рис. 25 показано приклад результатів розрахунку міцності вказаної конструкції під дією статичного (а) та змінного статичного (б) навантаження з різною концентрацією початкової пористості f_0 в області сплавлення. На основі результатів цих досліджень зроблено висновок, що максимальна допустима об'ємна концентрація пористості металу в зоні сплавлення шарів типових посудин тиску циліндричної форми складає близько 0,015, а просторовий розподіл пошкодження несуттєво впливає на несучу здатність конструкції.



(а) (б)

Рис. 25. Залежність величини максимального тиску (а) і максимальної кількості циклів навантаження (б) циліндричної посудини тиску ($D \times t$ = 300×2,5 мм, сплав ВТ1), отриманої пошаровим формуванням, від концентрації рівномірно розподіленої пористості в зоні сплавлення шарів f_0

Результати даної роботи успішно використано при виконанні замовлення корпорації *«Spacecraft» (KHP)* щодо розробки методології та програмного забезпечення для визначення допустимості дефектів несуцільності в металі шва та ЗТВ модуля орбітальної станції. Вимоги до цього проекту включали необхідність використання перевірених на практиці критеріїв граничного стану зварних конструкцій з дефектами та оцінки ймовірності аварійної ситуації за складних умов експлуатації модуля протягом 10 років. Спільне використання стандартизованих методик визначення допустимості тріщиноподібних дефектів, локальних втрат металу, пористості та дефектів форми зварних швів поряд із імовірнісними підходами, що враховували невизначеність результатів неруйнівного контролю (алгоритми Монте-Карло) та мікроруйнування (статистичні методи Вейбула) дозволило реалізувати відповідні програмні засоби та впровадити їх на потужностях корпорації «Spacecraft».

Запропоновані моделі та методи скінченно-елементного аналізу НДС трубопроводів при зварюванні та подальшій експлуатації реалізовано у розрахунковому пакеті Weldprediction 3.5, що призначений для розв’язання характерних задач експертного аналізу технологічної міцності відповідальних конструкцій при плануванні монтажного і/або ремонтного зварювання (термооброблення) кільцевих швів, а також прогнозуванні короткочасної і тривалої статичної міцності в процесі подальшої експлуатації зварної конструкції з урахуванням як її залишкового стану після зварювання, так і всього комплексу діючих робочих навантажень. Він використовується при проектуванні, оптимізації монтажу та при плануванні ремонту відповідальних трубопровідних елементів і посудин тиску з кільцевими зварними швами, зокрема, для потреб атомної енергетики. Також цей розрахунковий пакет використовується при обґрунтуванні роботоздатності та залишкового ресурсу безпечної експлуатації зварних конструкцій з урахуванням як їх прогнозованого стану та експлуатаційних умов, так і беручи до уваги виявлені при технічній діагностиці дефекти несуцільності (тріщини, неметалеві включення, локальні стоншення, газові пори). Weldprediction 3.5 було включено *ДП «НАЕК «Енергоатом»* до переліку програмних кодів, що дозволяється використовувати на об’єктах атомної енергетики України.

Спільно зі спеціалістами *Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України* за допомогою розробленого високопродуктивного програмного забезпечення в українському GRID (на інтелектуальній робочій станції Інпарком-GPU) були розв’язані тестові та прикладні задачі розрахунку напружено-деформованого та граничного станів ТЕ під внутрішнім тиском з урахуванням наявності локальних стоншень стінки та кільцевих зварних швів. Отримані дані свідчать, що використання високопродуктивних обчислень дозволяє істотно скоротити час виконання розрахунків: при розв’язанні СЛАР – в 50 разів, а всієї задачі – більше ніж в 20 разів. Використання гібридних схем розв’язання СЛАР (тобто додаткове використання графічних обчислювальних процесорів) дозволило прискорити відповідні розрахунки до 80 разів у порівнянні з персональними комп’ютерами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Набули подальшого розвитку комплексні методи прогнозування кінетики фізико-механічних процесів при зварюванні та експлуатації типових зварних трубопровідних елементів, що враховують докритичне руйнування металу за в'язким механізмом. Запропоновано чисельний критерій граничного стану зварних конструкцій, що враховує різні можливі механізми макроруйнування, а саме: гранична деформаційна здатність матеріалу, закритичний розвиток пористості в'язкого руйнування та мікровідкол. Доведено задовільну точність визначення граничного тиску в дефектних трубопроводах (на рівні 8-10 %). Розроблено та реалізовано нове покоління проблемно-орієнтованих високопродуктивних програмних засобів комп'ютерного моделювання технологічних процесів зварювання та споріднених процесів, що дозволяють прискорити проведення відповідних чисельних розрахунків до 80 разів.

2. На основі чисельного дослідження граничного стану типових трубопровідних елементів з поверхневими втратами металу біля ділянок монтажного або ремонтного зварювання показано, що взаємодія цих двох аномалій конструкції полягає у формуванні загальної області докритичного руйнування за в'язким механізмом, яка є зоною потенційного формування макроскопічного дефекту та порушення цілісності труби. Для випадку високотемпературної експлуатації трубопроводів цей ефект є більш суттєвим через додаткове деформування металу за механізмом повзучості. Показано, що вплив взаємодії геометричної аномалії та зони зварювання на граничний тиск в трубопроводі можна вважати незначним, якщо відстань між ними більша за умовну довжину дефекту.

3. Розроблено методики чисельного визначення ймовірності руйнування зварних трубопровідних елементів із виявленими поверхневими дефектами локальної корозійно-ерозійної втрати металу. В їх основу покладено принцип «слабкої ланки», що передбачає інтегрування полів головних напружень в рамках статистики Вейбула. Поряд із цим запропоновано альтернативний підхід, що базується на інтегральному аналізі полів інтенсивності деформацій і дозволяє більш адекватно аналізувати схильність до руйнування при суттєвому пластичному деформуванні до настання граничного стану, зокрема, в умовах високотемпературної повзучості. Для типових трубних сталей та алюмінієвих сплавів отримано значення коефіцієнтів розподілу Вейбула як функцій механічних властивостей матеріалу.

4. Розроблено багаторівневу методику ранжирування дефектів, виявлених при технічній діагностиці стану трубопроводів з позиції послідовності їх усунення методами ремонту зварюванням під тиском. Запропоновано трирівневий підхід розподілу дефектів за рівнем небезпеки: на основі поділу на групи відповідно до вимог нормативних документів, шляхом розрахунку залишкового запасу міцності, а також оцінкою ймовірності руйнування ділянки з одним чи декількома дефектами методом Монте-Карло. На прикладі модельних дефектів (тріщин, корозійних стоншень, вм'ятин) і даних ВТД ділянки магістрального газопроводу «Уренгой-Центр 2» показано ефективність безперервного

ранжирування великої кількості виявлених дефектів у порівнянні з підрозділом на групи за ступенем небезпеки, бо велика кількість дефектів можуть потрапити в кожну з груп.

5. Досліджено закономірності розвитку напружено-деформованого та пошкодженого станів типового елементу магістрального трубопроводу із зовнішнім дефектом корозійної втрати металу в процесі багатопрохідного ремонтного наплавлення. Показана менша консервативність розроблених чисельних критеріїв цілісності трубопроводу в порівнянні з існуючими підходами. На прикладі ремонтного наплавлення зовнішнього дефекту стоншення стінки трубопровідного елемента $D \times t$=1420×20 мм на основі двовимірних діаграм в координатах «ремонтний тиск - зварювальний струм» сформульовано вимоги до режимів, що дозволяють усувати дефекти глибиною до половини товщини стінки з мінімальним зниженням тиску в трубі (в діапазоні 4,1-5,8 МПа).

6. Запропоновано чисельну процедуру кількісної оцінки ефективності відновлення несучої здатності трубопроводів з поверхневими дефектами корозійно-ерозійної втрати металу за допомогою підсилювальних конструкцій. В якості кількісного параметра ефективності ремонту запропоновано функцію відношення ймовірностей руйнування дефектної конструкції до і після ремонту. Показано суттєвий вплив форми поверхневого контакту між дефектною трубою і підсилюючою конструкцією, що обумовлено розподілом контактного тиску. Достатня ефективність підсилення (близько 1,0) досягається тільки для геометричних аномалій, які дозволяють перерозподілити контактний тиск (зокрема, зовнішні дефекти напівеліптичної форми) та за виконання вимог до геометрії бандажа, ступеню його прилягання, величини внутрішнього тиску в трубопроводі при ремонті.

7. Розроблено та реалізовано комплекс математичних моделей для оцінки напружено-деформованого та пошкодженого станів волоконного композитного бандажа, встановленого на елемент трубопроводу з корозійними пошкодженнями, в залежності від технологічних параметрів ремонту і подальшої експлуатації. На прикладі бандажа з композиту системи «скловолокно-епоксидна смола» продемонстровано характер впливу товщини підсилюючого елемента та кількості шарів склотканини на ефективність відновлення несучої здатності дефектної ділянки трубопроводу. Показано істотний вплив докритичного пошкодження матеріалу бандажа на ефективність підсилення, яке зумовлює різке падіння ступеню розвантаження при збільшенні тиску в результаті локального випинання стінки трубопроводу в області дефекту стоншення.

8. Основні наукові результати роботи отримали промислове впровадження: при плануванні ремонту зварних швів трубопроводів першого контуру атомного ректору ВВР-М з виявленими дефектами множинної пористості металу зварних швів (ВП «Атоменергомаш»); для забезпечення допустимого рівня суцільності металу типових конструкційних елементів і посудин тиску, одержуваних методами пошарового формування (ПрАТ «НВО «Червона Хвиля»); при проектуванні відповідальних посудин тиску космічного призначення, елементів

конструкції модуля орбітальної станції виробництва корпорації «Spacecraft» (КНР). Програмне забезпечення, що базується на розроблених методиках, включено до переліку програмних кодів, що дозволяється використовувати на об'єктах атомної енергетики України при плануванні монтажного та/або ремонтного зварювання кільцевих швів. Практична значимість отриманих в роботі результатів стосовно задач забезпечення надійності експлуатації магістральних трубопроводів підтверджено довідкою АТ «Укртрансгаз».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації і які реферуються в наукометричних базах Scopus чи Web of Science:

1. Velikoivanenko E., **Milenin A.**, Popov A., Sidoruk V., Khimich A. Methods and Technologies of Parallel Computing for Mathematical Modeling of Stress-Strain State of Constructions Taking into Account Ductile Fracture. *Journal of Automation and Information Sciences*. **2014**. Vol. 46. No 11. P. 23-35.
2. **Milenin A.**, Velikoivanenko E., Rozynka G., Pivtorak N. Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. **2019**. Vol. 171C. P. 60-68.
3. Velikoivanenko E., **Milenin A.**, Popov A., Sidoruk V., Khimich A. Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*. **2019**. Vol. 55. No 1. P. 117-127.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації і які входять до Переліку наукових фахових видань України та в іноземних періодичних виданнях:

4. Махненко В.И., **Миленин А.С.**, Олейник О.И. Методика ранжирования коррозионных дефектов магистральных газопроводов, обнаруженных при внутритрубной диагностике. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2009**. № 3. С. 18-23.
5. Махненко В.И., **Миленин А.С.** Вероятностная методика ранжирования дефектов магистральных газопроводов для их ремонта без вывода из эксплуатации. *Збірник наукових праць Національного Університету кораблебудування*. **2009**. № 4 (427). С. 3-12.
6. **Міленін О.С.** Імовірнісний аналіз стану магістральних трубопроводів із виявленими дефектами та ресурс їх експлуатації після ремонту під тиском. *Вісник Тернопільського національного технічного університету. Спеціальний випуск*. **2011**. № 1. С. 73-81.
7. Махненко В.И., **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Олейник О.И., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Допускаемое давление для заполнителя герметичных муфт, используемых при ремонте магистральных трубопроводов. *Автоматическая Сварка*. **2011**. № 8. С. 25-30.
8. Махненко В.И., **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Взаимное влияние дефектов в зоне сварных соединений при различных силовых нагружениях. *Автоматическая Сварка*. **2012**. № 7. С. 3-6.

9. **Міленін О.С.**, Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. Чисельний аналіз розвитку в'язкого руйнування в області типових дефектів магістральних трубопроводів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. **2013**. № 3. С. 229-236.
10. **Миленин А.С.** К вопросу планирования ремонта магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации на основе результатов внутритрубной диагностики. *Автоматическая Сварка*. **2013**. № 5. С. 3-6.
11. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая Сварка*. **2013**. № 9. С. 36-31.
12. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Вероятностная оценка состояния трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами утонения. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2014**. № 2. С. 12-18.
13. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Анализ предельного состояния трубопроводного элемента при сварочной наплавке дефекта утончения. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. **2014**. № 1 (71). С. 168-173.
14. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой. *Автоматическая сварка*. **2015**. №1. С. 22-27.
15. **Milenin O.** Numerical prediction of the current and limiting states of pipelines with detected flaws of corrosion wall thinning. *Journal of hydrocarbon power engineering*. **2017**. Vol. 4. Issue 1. P. 26-37.
16. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Методика численного прогнозирования работоспособности трубопроводных элементов с коррозионно-эрозионными дефектами в условиях высокотемпературной эксплуатации. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2017**. № 4. С. 7-13.
17. Paton B.E., Lobanov L.M., Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., **Milenin A.S.** On application of AE technology in continuous monitoring of pipelines of power units operating at high temperatures. *The International Journal of Condition Monitoring*. **2018**. Vol. 8. Issue 4. P. 100-105.
18. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И., Химич А.Н., Сидорук В.А. Высокопроизводительные методы численных исследований для решения задач экспертизы работоспособности дефектных конструкций. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2018**. № 1. С. 27-23.
19. **Міленін О.С.**, Великоіваненко О.А., Саприкіна Г.Ю. Методологія чисельного аналізу статичної міцності алюмінієвих трубопроводів з дефектами в області кільцевих зварних швів. *Збірник наукових праць Моделювання та інформаційні технології.* **2018**. № 83. С. 105-117.
20. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Статистический анализ остаточной прочности дефектных трубопроводов при

высокотемпературной эксплуатации. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2019**. № 1. С. 13-25.
21. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Прогнозирование остаточной прочности трубопроводных элементов с обнаруженными коррозионными дефектами на основе метода Монте-Карло. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2019**. № 4. С. 25-30.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

22. **Milenin A.S.** Assessment of reinforcing constructions effectiveness at the repair of main pipelines with surface corrosion defects. *Сб. трудов V международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»*, под ред. В.И. Махненко 25-28 мая 2010 г., пос. Кацивели, Украина. ИЭС. **2010**. С. 161-165.
23. Махненко В.И., **Миленин А.С.**, Олейник О.И. Современные проблемы ремонта сухопутных магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. *Сб. докладов научно-технического семинара «Обеспечение эксплуатационной надёжности систем трубопроводного транспорта»*, 10-11 июня **2011** г., Киев, Украина, ИЭС. 2011. С. 13-20
24. Махненко В.И., **Миленин А.С.** Численный анализ степени усиления стенки трубопровода в зоне дефектов коррозионного утонения посредством муфты-бандажа. *Прочность материалов и элементов конструкций: труды научно-технической конференции*, посвящённой 100-летию со дня рождения академика НАН Украины Г.С. Писаренко, Киев, 28-30 сентября 2010 г. /Отв. ред. В.Т. Трощенко. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. **2011**. С. 315-324.
25. **Миленин А.С.** Ремонт магистральных трубопроводов без вывода из эксплуатации: практические рекомендации Института электросварки им. Е.О. Патона. *Материалы VII Международной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»,* 20-23 ноября **2012** г. Киев. УОНКТД. С. 351-363.
26. **Миленин А.С.** К вопросу численного анализа степени эксплуатационной повреждённости элементов трубопроводных систем. *Сборник трудов конференции «Неразрушающий контроль в трубопроводном транспорте»*, 16 октября **2013**. г. Киев. с. 32.
27. **Миленин А.С.** Методологические основы планирования ремонта магистральных трубопроводов без вывода из эксплуатации. *Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее. Сборник тезисов стендовых докладов конференции*. 25-26 ноября 2013 г., Киев, Украина, Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. **2013**. С. 133-134.
28. Сапрыкина Г.Ю., Махненко О.В., **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А. Расчётное определение работоспособности трубопровода из алюминиевого сплава АМг3 с обнаруженными в зоне сварных кольцевых соединений несплошностями в виде пор и крупных включений. *Сборник тезисов выступлений участников Международной научно-практической конференции*

«Актуальные проблемы машиностроения», Москва, 20-21 марта **2014** г., ЦНИИТМАШ. 2014. С. 40-41.
29. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Особенности численного анализа предельного состояния сварных конструкций на основе критериев пластической неустойчивости. *Сборник трудов седьмой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»,* 15-19 сентября **2014** г., г. Одесса. С. 54-59.
30. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Численное прогнозирование процессов зарождения и развития докритической повреждённости металла ответственных сварных трубопроводных элементов при статических и усталостных нагрузках. *Сборник трудов восьмой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»* под ред. И.В. Кривцуна. 19-23 сентября **2016** г., г. Одесса, Украина. С. 87-95.
31. **Міленін О.С.**, Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. Моделювання зародження та розвитку докритичного пошкодження матеріалу зварних трубопровідних елементів в умовах високотемпературної експлуатації. *Праці конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування»,* 19-22 вересня 2017 року. Т.: ТНТУ, **2017**. С. 26-29.
32. **Milenin A.**, Velikoivanenko E., Rozynka G., Pivtorak N. Probabilistic assessment of the state of welded pipeline elements and pressure vessels with detected corrosion-erosion defects. *Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*. Editor E.E. Gdoutos. Springer International Publishing. **2019**. P. 178-183.
33. **Milenin A.**, Velikoivanenko E., Rozynka G., Pivtorak N. Residual Strength and Reliability of Corroded Pipelines – Monte-Carlo Approach for Consideration of Spatially Nonuniform Material Properties. *Proceedings of the Second International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*. Editor E.E. Gdoutos. Springer International Publishing. **2019**. P. 321-326.
34. **Milenin A.**, Velikoivanenko E., Rozynka G., Pivtorak N. Damage Accumulation and Limit State of Welded Pipelines with Corrosion-Erosion Metal Loss Due to Ultra-Low-Cycle Fatigue. *Proceedings of the Third International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics*. Editor E.E. Gdoutos, M. Konsta-Gdoutos. Springer International Publishing. **2020**. P. 175-180.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати:

35. Махненко В.І., Великоіваненко О.А., **Міленін О.С.**, Розинка Г.П., Півторак Н.І. Розрахункова методика оцінки ефективності постановки муфт (бандажів) у зоні стоншення стінки магістрального трубопроводу. *Сб. праць Цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин».* К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ. **2012**. – 612 с.
36. Великоіваненко О.А., **Міленін О.С.**, Розинка Г.П., Півторак Н.І. Методологічні основи чисельного аналізу напружено-деформованого стану

трубопровідних елементів з урахуванням зародження, взаємодії та розвитку пор в'язкого руйнування. *Сб. праць Цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин».* К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ. **2015**. – 816 с.
37. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Численное прогнозирование эффективности усиления дефектных трубопроводов бандажами из композиционных материалов. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2016**. № 1. С. 12-18.
38. **Миленин А.С.**, Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении. *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2016**. № 4. С. 14-20.
39. **Миленин А.С.** Методы прогнозирования докритического разрушения конструкционных материалов под действием циклических нагрузок (обзор). *Техническая Диагностика и Неразрушающий Контроль*. **2017**. № 1. С. 16-24.
40. **Milenin A.** Numerical methods for determining the probability of failure of pipeline elements and pressure vessels under operating load. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. **2018**. № 7. С. 28-35.
41. **Миленин А.С.** Фундаментальные и технологические задачи планирования ремонтной сварочной наплавки коррозионных дефектов магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. *Сварщик*. **2018**. № 4. С. 6-13.
42. **Миленин А.С.** Обзор критериев допустимости поверхностных трещинообразных дефектов трубопроводных систем. *Сварщик*. **2019**. № 2. С. 12-17.
43. **Миленин А.С.** Обзор критериев допустимости поверхностных коррозионных дефектов (локальных потерь металла) сухопутных магистральных трубопроводов. *Сварщик*. **2019**. № 4. С. 19-24.

АНОТАЦІЯ

Міленін О.С. Надійність зварних трубопроводів з виявленими корозійно-ерозійними пошкодженнями в умовах експлуатації та ремонту під тиском. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології» – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, Київ, 2020.

В дисертації представлено комплекс методик прогнозування докритичного та критичного руйнування зварних трубопровідних елементів із тривимірними дефектами несуцільності металу та визначення закономірностей впливу монтажного та ремонтного зварювання на їх надійність, міцність і роботоздатність. Так, набули подальшого розвитку комплексні методи прогнозування кінетики фізико-механічних процесів при зварюванні та

експлуатації типових зварних конструкцій, що враховують докритичне та критичне руйнування металу за в'язким механізмом. Розроблено методи чисельного визначення ймовірності руйнування зварних трубопровідних елементів із виявленими поверхневими дефектами локальної корозійно-ерозійної втрати металу. В їх основу було покладено «принцип слабкої ланки», що передбачає інтегрування полів головних напружень чи інтенсивності пластичних деформацій в рамках статистики Вейбула. Це дозволило розробити та запровадити методи оцінки допустимості ізольованих та множинних дефектів типу газових включень і стоншень стінки трубопровідних елементів в області зварювання шляхом урахування особливостей технологічного процесу монтажного зварювання.

На основі розроблених методик продемонстровано шляхи більш широкого застосування типових методів ремонту трубопровідних елементів із виявленими корозійно-ерозійними дефектами за допомогою сучасних технологій ремонту зварюванням під тиском (контрольоване шліфування, багатопрохідне наплавлення, встановлення металевих і композиційних підсилювальних конструкцій).

Для проведення відповідних розрахунків реалізовано нове покоління високоефективних програмних засобів скінченно-елементного моделювання технологічних процесів зварювання та прогнозування роботоздатності зварних конструкцій.

Ключові слова: *трубопровідний елемент, зварювання, в'язке руйнування, локальна втрата металу, надійність, граничний стан, математичне моделювання, ремонт під тиском, ймовірність руйнування.*

ABSTRACT

Milenin O.S. Reliability of welded pipelines with revealed corrosion-erosion damages under operation and in-service repair. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtainment of Doctor of Science Degree in specialty 05.03.06 – «Welding and Related Processes and Technologies» – E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The Thesis presents a set of methods for predicting the subcritical and critical damage of welded pipeline elements with three-dimensional metal discontinuity defects and determining the way of influence of assembly and repair welding on their reliability, strength and operability. Thus, complex methods for predicting the kinetics of physical and mechanical processes in welding and operation of typical welded structures that take into account the fracture of metal by a ductile mechanism have been further developed. This allowed development and implementation of the methods for assessing the permissibility of isolated and multiple defects such as gas inclusions and wall thinning of pipeline elements in the region of welding by taking into account the features of the assembly welding process.

Methods of numerical assessment of the probability of fracture of welded pipeline elements (pressure vessels) with revealed surface defects of local corrosion-erosion metal loss have been developed. The integration of the fields of principal stresses within Weibull statistics was assumed as its basis, which allows taking into account the residual postweld stress-strain state. In addition, it has been proposed an alternative approach based on the integral analysis of the plastic strain intensity fields. It allows fulfilling more adequately analysis of the tendency to fracture in case of the significant development of plastic strains before the limiting state, in particular, at high-temperature creep. Weibull distribution coefficients were obtained for typical pipe steels and aluminum alloys to determine the probability of failure of welded pipeline elements with detected three-dimensional metal discontinuities.

Based on the developed methods, ways of wider application of typical methods for repairing pipeline elements with detected corrosion-erosion defects using up-to-date technologies of in-service repair (controlled grinding, multi-pass surfacing, installation of metal and composite reinforcing structures) are demonstrated. For analysis of the results of inline diagnostics of long sections of the pipelines, a multilevel technique of defect ranking for determination of the sequence of their elimination by in-service welding repair was developed. Three-level approach for the distribution of defects by danger level was proposed. It is based on the division into groups according to the requirements of regulatory documents, by assessment the residual safety factor as well as by estimating the probability by the Monte-Carlo method. In addition, within the third level, it is proposed to rank not only the revealed defects, but also the areas with multiple defects to increase the efficiency of repair of the sections of a certain length.

The numerical procedure has been developed for quantitative assessment of the effectiveness of bearing capacity renewing of pipeline with corrosion-erosion metal losses by means of reinforcing structures. As a quantitative parameter of repair effectiveness the function of the ratio of the probabilities of defective structure failure before and after repair was offered. It allows taking into account the features of interaction in a contact pair using up-to-date techniques for numerical prediction of the stress-strain state of critical structures.

To carry out the corresponding calculations, a new generation of efficient software for finite element modeling of welding processes and predicting the operability of welded structures was implemented. They are based on the proposed complex models of welding processes and algorithms of prediction of the welded structures workability, the corresponding finite element description and solvers, which involve the use of multiprocessor systems of different levels, namely supercomputers, clusters, GRID systems, computers of hybrid architecture. It is shown that the use of these approaches to solve the typical problems of determining the residual life of pipeline elements and pressure vessels with revealed defects allows accelerating the numerical calculations up to 80 times.

Keywords: *pipeline element, welding, ductile fracture, local metal loss, reliability, limiting state, mathematical modeling, in-service repair, probability of failure.*

Підп. до друку 20 липня 2020 р. Формат 60×84/16. Пап. оф. №1. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 3,2. Умов. фарбо-відб. 3,6. Наклад 130 прим. Зам. № 360
ПОД ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 69.