

УДК 539.3:539.42:620.191.33

Р.М. КУШНІР¹, І.М. ДМИТРАХ²¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України
вул. Наукова, 3б, Львів, 79060, Україна²Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, Львів, 79060, Україна

ТЕОРІЯ І МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА МІЦНОСТІ ТВЕРДИХ ДЕФОРМІВНИХ ТІЛ З КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ

У статті висвітлено важливу для України наукову і прикладну проблему – розвиток теорії та розроблення ефективних методів розв’язування нових задач статичного й динамічного деформування, граничної рівноваги та розрахунку міцності просторових і тонкостінних (оболонкових і пластинкових) елементів конструкцій з концентраторами напружень (тріщинами, тонкими та масивними включеннями, отворами тощо) у разі різноманітних видів силового і температурного навантажень з урахуванням впливу реальних робочих середовищ.

Ключові слова: оболонкові і пластинкові елементи конструкцій, концентратори напружень, статичні, динамічні й температурні навантаження, робочі середовища.

ВСТУП

Проблема міцності елементів конструкцій під час тривалої експлуатації є дуже актуальною для всіх індустріально розвинених держав, у тому числі й для України. Це зумовлено тим, що більшість споруд і засобів матеріального виробництва машин тривалої експлуатації в усіх країнах введено в дію досить давно (деякі понад 50 років тому). У процесі експлуатації матеріали старіють, втрачають свої початкові технічні характеристики, в їхній структурі з’являються різні дефекти, зокрема на зразок тріщин (небезпечні концентратори напружень) тощо. Такі зміни властивостей конструкційних матеріалів спричинюють втрату роботоздатності споруд і устаткування та загрозу їх руйнування. Тому сьогодні над розроблен-

ням теорії методів оцінювання залишкового ресурсу роботоздатності конструкцій тривалої експлуатації інтенсивно працюють науковці та інженери-практики в багатьох країнах.

Цій проблемі присвячено цикл робіт [1–29], метою яких є розвиток теорії та розроблення ефективних методів розв’язування нових задач статичного й динамічного деформування, граничної рівноваги та розрахунку міцності просторових і тонкостінних (оболонкових і пластинкових) елементів конструкцій з концентраторами напружень (тріщинами, тонкими й масивними включеннями, отворами тощо) у разі різноманітних видів силового і температурного навантажень з урахуванням впливу реальних середовищ.

Наукова новизна та оригінальність розробленої теорії, її переваги над світовими аналогами полягають у такому:

© Р.М. Кушнір, І.М. Дмитрах, 2013

- висока адекватність фізичних і запропонованих математичних неklasичних моделей концентраторів напружень;

- можливість застосування для дослідження неоднорідних структур на макро-, мезо-, мікро- і нанорівнях;

- введення в аналіз довільної геометрії структурно неоднорідних тіл, множинності дефектів і ймовірності їх розвитку;

- розгляд довільних фізико-механічних властивостей елементів структури тіл, зокрема й заповнень тріщин;

- врахування ускладненої неоднорідності, пластичності, пошкоджуваністю зовнішнім середовищем структури матричного матеріалу, а також взаємодії фізико-механічних і температурних полів;

- розгляд впливу монотонних, періодичних у часі й нестационарних навантажень.

Запропоновані нові методи розрахунку параметрів напруженого стану та міцності тіл характеризуються низкою переваг над світовими аналогами:

- загальність припущень щодо характеру зовнішніх збурень та їх просторових і часових розподілів, а також топологічних та фізико-механічних характеристик складових структури тіл;

- придатність для вивчення взаємовпливу чинників різної фізичної природи;

- математична деталізація моделей, яка дає можливість у багатьох випадках отримати прозорі аналітичні розв'язки;

- оригінальна числова алгоритмізація розрахунків, що забезпечує їх використання в інженерній практиці.

Практична значущість методів зумовлена:

- можливістю поєднання отриманих результатів уточненого вивчення напруженого стану структурно неоднорідних тіл зі здобутками наявних теорій з метою надійнішого оцінювання міцності та довговічності інженерних конструкцій;

- поглибленням критеріїв руйнування, які сприяють не лише кращому розумінню механізмів руйнування і пластичного деформування, а й підвищенню достовірності розрахунків на міцність;

- можливістю забезпечити надійне технічне діагностування та моніторинг елементів відповідальних споруд і конструкцій за допомогою опрацьованих методів та засобів, що ґрунтуються на явищі акустичної емісії;

- використанням отриманих результатів під час успішної реалізації завдань цільової програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», прийнятої на виконання Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки;

- з'ясованими в циклі робіт можливостями використання отриманих теоретичних результатів у інших галузях механіки деформівного твердого тіла (теорії пластичності, механіці композитів і наноструктур, механіці руйнування, в'язкопружності), а також у вирішенні важливих інженерних проблем теплоенергетичного й металургійного обладнання, технічної діагностики матеріалів та елементів конструкцій, розрахунку на міцність і довговічність будівельних, трубопровідних і транспортних систем.

Об'єднання наукових праць у єдиний цикл обґрунтовується дослідженням у них споріднених, важливих для практики явищ концентрації напружень у твердих деформівних тілах, уніфікованим математичним описом механічних полів засобами теорії потенціалу та інтегральних рівнянь, повнотою результатів, що охоплюють як розрахунок напружено-деформованого стану тіл з концентраторами напружень, так і гранично-рівноважного стану (міцності та ресурсу експлуатації) на основі опрацьованих концепцій і критеріїв їх деформування та руйнування.

Зазначений цикл складається з таких розділів:

- тривимірні задачі механіки деформівного твердого тіла з концентраторами напружень;

- двовимірні задачі механіки деформівного твердого тіла з концентраторами напружень, зокрема механіки руйнування;

- розроблення теоретичних основ і методів розрахунку цілісності оболонкових і трубопровідних систем з концентраторами напружень;

- розроблення аналітико-експериментальних методів оцінювання руйнування та міцності тіл з концентраторами напружень з урахуванням впливу реального середовища та історії навантаження.

ТРИВИМІРНІ ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ
ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА
З КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ

Розроблено основи теорії теплопровідності й термопружності тривимірних тіл із тріщинами та тонкими пружними і жорсткими включеннями [4, 5, 9], яка базується на розвитку методу потенціалів і методу функцій стрибка з подальшим зведенням відповідних статичних та динамічних задач механіки до граничних інтегральних рівнянь (ГІР); розв'язанні шляхом обернення цих рівнянь широкого класу актуальних задач концентрації теплових і силових напружень в околі просторових тріщин і тонких включень без обмежень на характер напружено-деформованого стану (статичний, усталений чи нестационарний), геометричні параметри концентраторів (форма, кількість, взаємне розташування), пружні властивості включень і матричного середовища.

У рамках цієї теорії здійснено гранично-інтегральне формулювання (подання розв'язків в інтегральній формі й отримання ГІР) просторових нестационарних задач теплопровідності та статичних задач термопружності для безмежного тіла з довільно розміщеними плоскими тріщинами (рис. 1) за допомогою теплових і пружних гармонічних потенціалів [4, 5]. При цьому густинам потенціалів надано прозорого фізичного сенсу: для задач теплопровідності це густини джерел і диполів тепла на поверхнях тріщин, а для задач термопружності — це стрибки зміщень протилежних поверхонь тріщин. Методику поширено на тіла з багатозв'язними тріщинами, а також на обмежені тіла з тріщинами.

Під час розгляду тривимірних статичних задач теплопровідності й термопружності для безмежного тіла з пружним тонким

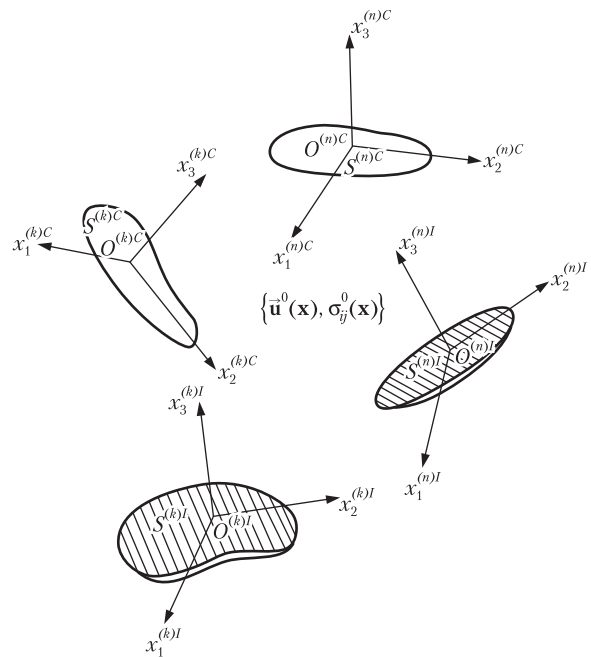


Рис. 1. Тривимірні задачі механіки деформівного твердого тіла з концентраторами напружень

включенням змінної товщини гранично-інтегрального формулювання досягнуто за допомогою подання розв'язків комбінацією гармонічних потенціалів і задоволення ефективних крайових умов на серединній поверхні включення за прийняття певних гіпотез щодо розподілу параметрів стану по його товщині. В ролі густин потенціалів виступають відповідно стрибки переміщень чи напружень на місці серединної поверхні включення. Як частинні, отримано спрощені моделі для контрастних тонких включень малої й великої жорсткості.

Розроблено нові високопродуктивні аналітичні й аналітико-числові методи розв'язування одержаних ГІР [11, 12] з метою охоплення повного спектра тривимірних задач механіки руйнування. Для дослідження термопружного стану тіл з дисковими довільно розташованими тріщинами, а також неплоскими тріщинами по сфероїдальній та циліндричній поверхнях, використано метод малого параметра. Побудовано фундаментальні розв'язки для визначення напружень біля

еліптичної тріщини в безмежному тілі за довільного закону навантаження її берегів. Розроблено інженерні розрахункові методи для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) в околі такого дефекту через уведення точкових вагових функцій. Для тріщин з довільною конфігурацією контуру запропоновано спосіб аналітично-числового розв'язування ГР, що ґрунтується на їх регуляризації з подальшим гранично-елементним конструюванням дискретних аналогів у вигляді систем лінійних алгебричних рівнянь.

На основі отриманих результатів вивчено вплив розмірів та форм тріщин і тонких включень, їхніх теплофізичних характеристик, взаємодії між собою та з межею тіла на його тривимірний термопружний і гранично-рівноважний стан під дією силових і температурних факторів.

Підхід узагальнено на тривимірні динамічні задачі теорії тріщин у лінійній постановці та теорії тонких пружних і жорстких включень. У задачах поширення пружних хвиль у безмежних тілах з такими концентраторами напружень, як складові в інтегральних зображеннях розв'язків, за усталеного деформування залучено потенціали Гельмгольца, а за нестационарного деформування хвильові. Це дало можливість тотожно задовольнити вихідні хвильові рівняння й умови випромінювання на нескінченності. Густина потенціалів в отриманому інтегральному поданні характеризують динамічне розкриття тріщини чи перенесені на включення динамічні зусилля. Для знаходження цих функцій через задоволення умов на поверхнях дефекту виведено системи ГР як у часовій, так і частотній областях. ГР задач про кінетику жорсткого включення у пружній матриці замкнено рівняннями руху включення як цілого. Вказаний підхід у поєднанні з принципом суперпозиції та застосуванням функцій Гріна реалізовано також стосовно тривимірної дифракції пружних хвиль на системі довільно розміщених тріщин, тріщин і дискових жорстких включень, а також на просторовій підпо-

верхневій тріщині в біматеріалі за ідеальних та неідеальних умов контакту його складових.

Для комплексного вивчення динамічних процесів у тілах із плоскими тріщинами та тонкими включеннями розроблено ефективні в широкому часовому і частотному діапазонах чисельні методи розв'язування отриманих ГР — покроковий (маршовий) метод на основі регуляризації ГР у часовій області для нестационарно навантажених тіл і гранично-елементний метод на основі регуляризації ГР у частотній області для гармонічно навантажених тіл. Розв'язок системи ГР стосовно викривленої просторової тріщини в низькочастотному хвильовому полі отримано асимптотичним методом. Здійснено практично важливі дослідження концентрації напружень поблизу просторових тріщин і тонких включень з урахуванням інерційних ефектів. Зокрема, проаналізовано вплив на КІН в околі таких тріщин і включень їх форми й жорсткості, взаємодії між собою та з поверхнями ідеального й неідеального поділу матеріалів, часових профілів, хвильових напрямків і мод зовнішніх збурень.

Розв'язано динамічні задачі про утворення та стрибкоподібний ріст тріщини під дією корозійно-механічних чинників. Проаналізовано форму імпульсів пружних хвиль, їх тривалості та діаграм випромінювання під час утворення тріщини зсуву, оцінено вплив пружних хвиль на переміщення поверхні півпростору в процесі утворення тріщини. Встановлено аналітичні залежності між КІН, приростом наскрізної та плоскої тріщин у тривимірному тілі та параметрами пружних хвиль акустичної емісії (АЕ), спричинених корозійним розтріскуванням, статичним і циклічним навантаженнями.

Запропоновано розрахункову модель розвитку тріщин нормального відриву, поперечного та поздовжнього зсувів як випромінювачів пружних хвиль [1, 8]. На цій основі встановлено залежності між КІН, приростом тріщин і параметрами пружних

хвиль АЕ: підсумковим рахунком, швидкістю рахунку та їхніми амплітудами. Створено методологію визначення геометричних і силових характеристик тріщин, що розвиваються. Розроблено критерії селекції пружних хвиль, методики оцінювання стадій їх розвитку за кількісним аналізом їхніх параметрів, що покладено в основу створення національного стандарту, який регламентує АЕ-діагностування реальних промислових об'єктів. Розроблено також теоретичні засади методології кількісного визначення об'ємної пошкодженості кристалічних тіл у зоні пластично деформованого об'єму [8].

ДВОВИМІРНІ ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА З КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ

На основі методів функцій стрибка, теорії функцій комплексної змінної, інтегральних перетворень і запропонованого підходу до постановки та розв'язання двовимірних задач теплопровідності, теорії пружності й термопружності для ізотропних та анізотропних середовищ з тонкими неоднорідностями закладено наукові засади математичної теорії тонких пружних і непружних включень довільної товщини й профілю [9], в рамках якої з єдиних позицій розв'язано антиплоскі та плоскі задачі для тонкостінних неоднорідностей з довільними механічними й теплофізичними властивостями, у тому числі абсолютно жорстких, гнучких нерозтяжних включень чи абсолютно податливих, які відповідають тріщинам.

Розглянуті задачі пружної рівноваги тонких включень на межі поділу матеріалів двох ізотропних чи анізотропних середовищ узагальнено на довільну систему плоских включень в однорідному безмежному просторі й півпросторі та на випадок викривлених поверхонь неоднорідностей, а також на системи таких включень у багатошарових структурах (рис. 2). Розглянуто граничні випадки для однієї міжфазної щілини та абсолютно жорсткої півки чи включення, а

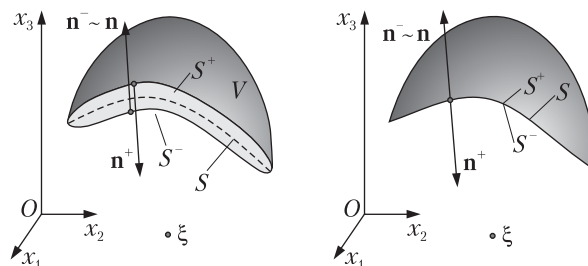


Рис. 2. Двовимірні задачі механіки деформівного твердого тіла з концентраторами напружень та задачі механіки руйнування

також для відповідних періодичних структур, для яких отримано аналітичні розв'язки для всіх видів силового і дислокаційного навантажень. Аналітичні розв'язки для одного включення або числово-аналітичні розв'язки відповідних двоперіодичних задач дають змогу визначити ефективні сталі структурно неоднорідного середовища зі стрічковими включеннями.

З метою вивчення механізмів руйнування та пластичного деформування тіл досліджено силу, що діє на дислокації поблизу тонких неоднорідностей. Отримано вирази для сили, що діє на гвинтову та крайову дислокації біля тріщини та абсолютно жорсткого включення в анізотропному середовищі. Досліджено емісію дислокацій з поверхні стрічкового включення.

Підтверджено ефективність застосування запропонованої теорії для визначення полів температури, напружень і переміщень під дією потоків тепла, однорідного поля напружень на нескінченності, джерел тепла, сил, моментів, гвинтових і крайових дислокацій, температурних, силових та дислокаційних диполів.

Розроблено методику визначення квазістатичних температурних напружень у багатозв'язних пластинках з тепловіддачею з використанням уточнених формул чисельного обернення перетворення Лапласа і методу інтегральних рівнянь. З її допомогою досліджено розподіли температури і спричинених нею напружень у пластинках з отворами та тріщинами.

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ
І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЦІЛІСНОСТІ
ОБОЛОНКОВИХ І ТРУБОПРОВІДНИХ
СИСТЕМ З КОНЦЕНТРАТОРАМИ
НАПРУЖЕНЬ

Створено математичні основи загальної моментної та уточненої типу Тимошенка теорій тонких ізотропних та анізотропних однорідних і неоднорідних оболонок з тріщинами за пружного й пружно-пластичного деформування [6, 7]. При цьому здійснено загальну постановку задач про напружений стан згаданих оболонок за довільного орієнтування тріщин. У результаті отримані в просторі узагальнених функцій системи диференціальних неоднорідних рівнянь ураховують зосереджені на поверхнях розрізів і поділу різнорідних складових функціонали, густини яких є комбінаціями стрибків переміщень і кутів повороту та похідних від них. Побудовані фундаментальні розв'язки таких систем і на їх основі фундаментальні матриці переміщень дали змогу отримати інтегральне подання компонент вектора переміщень, що враховує неоднорідність і геометрію оболонок з тріщинами.

Дослідження граничної рівноваги пружно-пластичних оболонок з тріщинами проводиться на основі аналога δ_c -моделі, за допомогою якого пружно-пластичну задачу зведено до пружної для такої самої оболонки з тріщинами невідомих довжин, до берегів

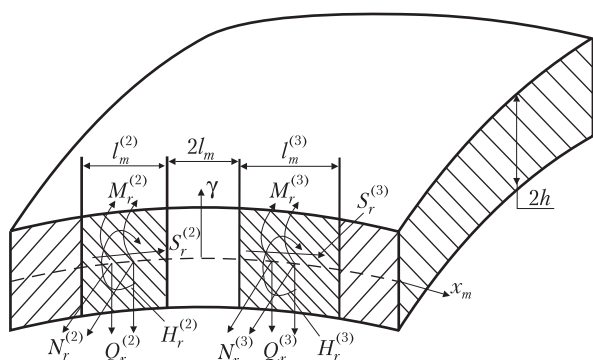


Рис. 3. Розроблення теоретичних основ і методів розрахунку цілісності оболонкових і трубопровідних систем з концентраторами напружень

яких прикладено деякі зусилля та моменти, що задовольняють умови пластичності тонких оболонок (рис. 3). Ці зусилля й моменти можуть бути сталими або змінюватися за лінійним, квадратичним чи кубічним законом, що дає можливість розглядати оболонки, матеріалам яких властиве нелінійне зміцнення. Отриману пружну задачу за допомогою методу дисторсій зведено до системи сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) з невідомими межами інтегрування та розривними правими частинами. Запропоновано алгоритм чисельного розв'язування отриманих систем СІР сумісно з умовами пластичності й умовами обмеженості зусиль і моментів біля тріщин. Аналог δ_c -моделі поширено на неоднорідні за товщиною оболонки обертання, послаблені поверхневими тріщинами, а також на кусково-однорідні циліндричні оболонки з такого роду дефектами.

Розроблено математичну модель механіки однорідних і кусково-однорідних оболонкових елементів конструкцій із залишковими технологічними напруженнями [3, 6, 7]. На її основі задачі про визначення залишкових технологічних напружень зводяться до розв'язування узагальненої оберненої багатопараметричної задачі комп'ютерної томографії тензорного поля, що включає як рівняння механіки тіл з власними напруженнями, так і деякі інтегральні характеристики, отримані експериментально. Така математична модель дає можливість побудувати ефективний регуляризований алгоритм її розв'язування, який апробовано на оболонках, виготовлених із оптично активних матеріалів.

Розвинуто положення нелінійної механіки руйнування стосовно зварних з'єднань оболонок з урахуванням їх неоднорідності щодо механічних властивостей та високої залишкової напруженості [3] і на цій основі виявлено особливості руйнування матеріалів і зварних з'єднань та методи оцінювання опору руйнуванню й міцності зварних елементів металоконструкцій.

Задачі про пружну граничну рівновагу оболонок з довільно орієнтованими тріщинами

за допомогою методу дисторсій зведено до лінійних систем граничних СІР. З використанням методу узагальнених задач спряження запропонований підхід поширено також на випадок кусково-однорідних оболонок. Отримані при цьому системи СІР містять також невідомі стрибки вектора переміщень та їхніх похідних на поверхнях поділу різнорідних складових оболонок. Задачі термопружності для однорідної та кусково-однорідних циліндричних оболонок з термоізолюваними тріщинами або з тріщинами, на берегах яких підтримується стала температура, також зведено до систем СІР.

Здійснено числовий аналіз залежності параметрів тріщиностійкості (коефіцієнтів інтенсивності зусиль і моментів, розкриття фронту тріщини) від навантаження, величини та розподілу температурних і залишкових напружень, неоднорідності матеріалу оболонки, її механічних і геометричних параметрів. Вказано межі застосовності наявних моделей оболонок із тріщинами, а також наведено прості критеріальні співвідношення для визначення критичного навантаження для заданих розмірів оболонки й наскрізної чи поверхневої тріщини з урахуванням пружного та пружно-пластичного деформування.

Виконано оригінальні дослідження з розроблення критеріїв і визначення граничного стану елементів конструкцій з тріщинами та створено аналітичні й числові методи розрахунку напруженого стану елементів трубопроводів з дефектами різної природи з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності [13, 14]. Розроблено ефективні методики визначення характеристик тріщиностійкості за різних видів навантажень, зокрема під час динамічного випробування зразків на триточковий згин. Обґрунтовано застосування методу зосереджених податливостей для товстостінних циліндрів і тонкостінних труб з крайовими тріщинами, вперше виявлено ефект впливу величини тиску в трубі на безрозмірні значення КІН, спричинений їхньою геометричною нелінійністю.

Запропоновано аналітичні моделі розподілу напружень у граничній пластичній зоні, що оточує дефект у тонкостінних конструкціях (трубах, згинах труб, патрубках), уперше пояснено відмінність граничного стану за в'язкого руйнування для поверхневих і наскрізних тріщин, у тому числі множинних, теоретично обґрунтовано можливість реалізації явища текучості перед руйнуванням. Створено методики розрахунку загальних полів напружень і крайових ефектів у елементах трубопровідних систем.

РОЗРОБЛЕННЯ АНАЛІТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ І МІЦНОСТІ ТІЛ З КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ РЕАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ

Згідно із запропонованою оригінальною концепцією фізико-хімічної ситуації в околі гострокінцевих концентраторів напружень (рис. 4), стан зони передруйнування матеріалу описується одночасно параметрами, що характеризують напружено-деформований стан (НДС) матеріалу і є функціями прикладених до тіла зовнішніх зусиль, та параметрами, які визначають у часі фізико-хімічні процеси, що відбуваються між деформованим металом і середовищем [2].

На цій основі розроблено сучасну методологію та новий науковий інструментарій для визначення характеристик локальної фізико-механічної взаємодії середовища і деформованого матеріалу біля концентраторів напружень. Сформульовано нові критерії й підходи для визначення базових характеристик міцності матеріалів з урахуванням НДС матеріалу і фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час його взаємодії з агресивним середовищем [15–17]. Зокрема, запропоновано й широко апробовано метод прогнозування порогових коефіцієнтів інтенсивності напружень під час розтріскування металів і сплавів за статичного й циклічного навантажень у корозійних середовищах. Створено новий ефективний метод побудови

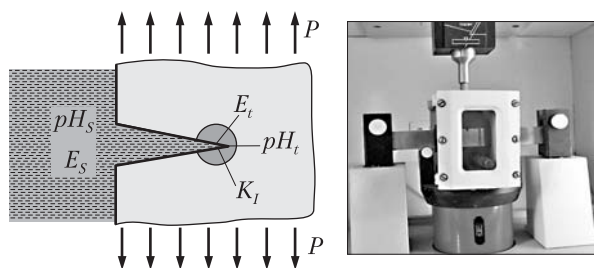


Рис. 4. Фізико-хімічна ситуація в околі гострокінцевого концентратора напружень (тріщини): K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень; E_t – електродний потенціал металу; pH_t – рН середовища

інваріантних (однозначних) діаграм тріщиностійкості матеріалів, який є базисом для розрахунку міцності й довговічності елементів конструкцій, що працюють у корозійно-агресивних середовищах [15].

Розроблено нові методи оцінювання міцності твердих деформівних тіл з концентраторами напружень в умовах дії водневих середовищ, а також одержано важливі результати про локальну взаємодію водню з матеріалом в околі тріщиноподібних концентраторів напружень. Для оцінювання локальної міцності матеріалів біля концентраторів напружень за наявності водню запропоновано діаграму «енергія локального руйнування – концентрація водню», яку розглядають як інваріантну криву для заданої системи «матеріал–середовище». Її ефективність підтверджено експериментально дослідженням впливу наводнювання на міцність конструкційних сталей для труб і устаткування газопроводів.

Створено теоретичні основи і розроблено методи прогнозування впливу історії навантаження, зокрема попереднього пластичного деформування, одно- і багаторазових перевантажень, на міцність і довговічність тіл з тріщинами в умовах квазістатичного навантаження, в тому, короткотривалої й динамічної повзучості [10]. Запропоновано узагальнену модель росту втомних тріщин (РВТ), що ґрунтується на аналізі НДС, енергетичному критерію руйнування і враховує окрихчування матеріалу в околі вістря

тріщини за циклічного навантаження. На цій основі запропоновано методологію прогнозування, яка дає змогу моделювати її стабільний і нестабільний (стрибками) ріст, а також вплив попереднього пластичного деформування на швидкість РВТ. Методологію апробовано на матеріалах корпусів атомних реакторів.

Розроблено модель РВТ після одноразового перевантаження, що ґрунтується на концепції наявності пластичних зон, визначенні мінімальної швидкості росту тріщини після перевантаження, залишкових (стискальних) та ефективних напружень перед вістрям тріщини і модифікованому рівнянні Уокера. Модель урахує початковий етап запізнення затримки РВТ після перевантаження. На цій основі запропоновано методу прогнозування швидкості РВТ після одноразового перевантаження і нерегулярного асиметричного навантаження, яку широко апробовано для матеріалів авіаційних конструкцій.

Досліджено механізми зародження і росту мікротріщин у теплостійких сталях, виявлено взаємозв'язок між параметрами мікротріщин (середньою довжиною і щільністю) та питомою енергією пружно-пластичної деформації, розсіяною в матеріалі. Виявлено закономірності впливу попередньої одноразової й циклічної пластичної деформації на швидкість росту втомних тріщин, силові й деформаційні критерії руйнування за статичного і циклічного навантажень. Запропоновано класифікацію матеріалів за чутливістю швидкості РВТ і порогової тріщиностійкості до попереднього пластичного деформування.

Виявлено закономірності й мікромеханізми деформування та руйнування матеріалів в умовах комбінованого розтягу, статичної і динамічної повзучості, в тому числі тіл із тріщинами. Розроблено оригінальну методологію підвищення опору квазікрихкому руйнуванню теплостійких сталей, яка ґрунтується на комбінованому попередньому термомеханічному навантаженні, забезпечує більш значний ефект теплового пере-

вантаження порівняно з відомими способами й одночасно знижує максимальні напруження в конструкції.

ПРАКТИЧНА ЗНАЧУЩІСТЬ РОЗРОБЛЕНИХ ПІДХОДІВ І МЕТОДІВ

Із застосуванням запропонованих вище наукових підходів і методів виконано низку важливих прикладних досліджень, зокрема за завданнями цільової програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», спрямованими на оцінювання міцності, робоздатності та залишкового ресурсу відповідальних елементів промислових і будівельних конструкцій, обладнання теплової (рис. 5) та атомної енергетики, авіаційного транспорту і металургії, важливих трубопроводних і транспортних систем.

Спочатку їх було апробовано в лабораторних умовах, де встановлено особливості руйнування і проходження пружних хвиль

у сталях, кольорових сплавах, бетоні й залізобетоні, скловолоконних композитах, склі тощо. Для застосування створених методик АЕ-діагностування на промислових об'єктах контролю додатково розроблено і виготовлено спеціальні вимірювальні засоби, необхідні вузли та пристрої (рис. 6). У результаті проведено діагностичні обстеження мостів через ріки Західний і Південний Буг, Прут, Дністер, Дніпро, шляхопроводу біля м. Надвірна Івано-Франківської обл., транспортного тунелю під дорогою державного значення біля смт Олесько Львівської обл. тощо. Всі об'єкти мали різні конструкційні виконання, габарити, вікові та стратегічні категорії. Їх обстеження й діагностування з використанням розроблених у запропонованому циклі наукових праць нових методологічних засад підтвердило ефективність опрацьованих методик і засобів для виявлення місць руйнування несівних елементів конструкцій.

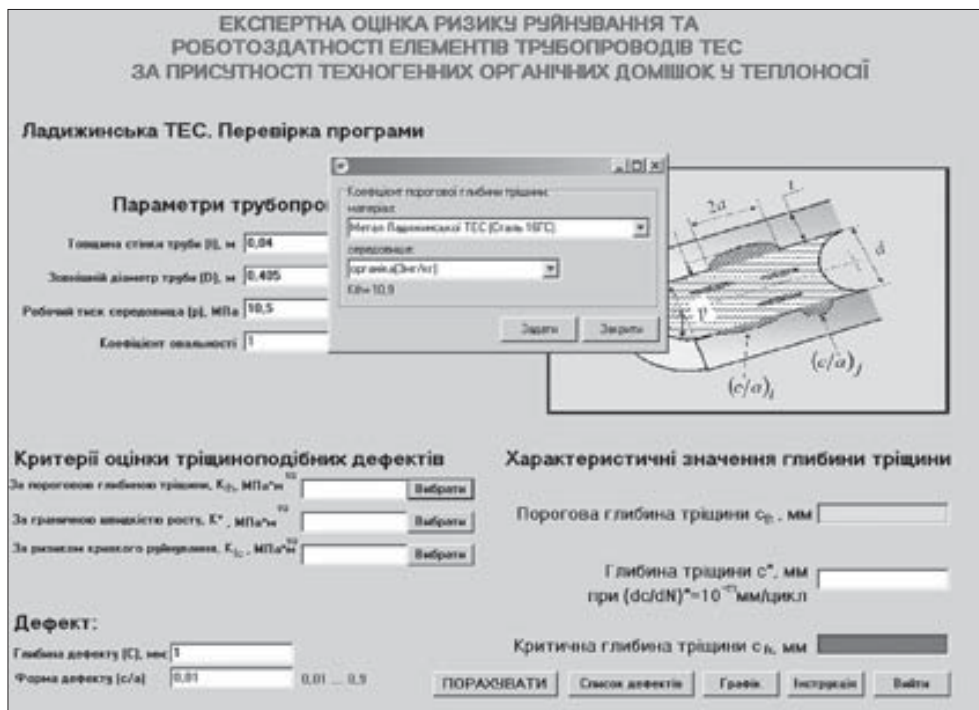


Рис. 5. Експертна система для технічної діагностики робоздатності основних конструкцій елементів та запобігання виникненню аварійних ситуацій у парогенерувальних системах енергоблоків закритичного тиску ТЕС



Рис. 6. АЕ-діагностування згинів трубопроводу живильної води енергоблока потужністю 300 МВт Ладизинської ТЕС

Проведено також АЕ-діагностування інших об'єктів промисловості України: резервуара місткістю 75 000 м³ для зберігання нафти, згинів трубопроводів живильної води енергоблоків закритичного тиску на Ладизинській ТЕС, обладнання нафтоперекачувальних станцій магістрального нафтопроводу «Дружба» (зокрема, НПС «Плещівка», «Чижівка», «Новини», «Куровичі», «Жулин», «Долина») та низки інших об'єктів промислового призначення, де в методології обстежень застосовано результати розв'язків динамічних задач теорії тріщин та інших теоретико-експериментальних досліджень.

Для оцінки стану магістральних нафтопроводів розроблено методика оцінювання впливу залишкових напружень на статичну міцність окремих їх ділянок з тріщиноподібними дефектами й корозійними виразками у зоні зварних з'єднань, яка побудована на основі експериментально-розрахункового підходу. Методику використовували разом зі спеціально створеним для цього програмним забезпеченням, що дало можливість обробляти інформацію, отриману інтелектуальним поршнем фірми «Rosen Engineering GmbH», з подальшим її використанням для необхідних розрахунків. Методику впроваджено на низці об'єктів трубопроводного транспорту України підприємствами «Львів-

трансгаз» і «Прикарпаттрансгаз» ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України» а також «Придніпровські магістральні нафтопроводи» ВАТ «Укртранснафта».

Розроблено також методи оцінювання технічного стану та залишкової довговічності тривало експлуатованих роликів машин безперервного лиття заготовок, які впроваджено на ЗАТ «Азовмаш», ВАТ «МК Азовсталь» та в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

На АНТК ім. О.К. Антонова знайшли своє застосування методики та програмні засоби для оцінювання граничного стану елементів конструкцій літака, прогнозування швидкості росту в них втомних тріщин, впливу комбінованого навантаження на тріщиностійкість, визначення порогових характеристик циклічної тріщиностійкості тощо. Аналогічні розрахункові методики з оцінювання крихкої міцності та довговічності корпусів реакторів атомних електростанцій впроваджено на Рівненській АЕС.

Результати прикладних досліджень зазначеного циклу праць увійшли до 4 довідникових посібників [26–29], захищені патентами України [18–23] і стали основою для розроблення двох національних стандартів — з проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки [24] та з визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами [25].

* * *

18 травня 2012 р. опубліковано Указ Президента України № 329/2012 «Про присудження Державних премій України в галузі науки і техніки 2011 року». Серед лауреатів відзначено і цикл наукових праць «Теорія і методи розрахунку напружено-деформованого стану та міцності твердих тіл з концентраторами напружень» колективу науковців (Г.С. Кіт, Р.М. Кушнір, І.М. Дмитрах, В.В. Михаськів, М.М. Николишин, В.Р. Скальський, І.В. Ориняк, П.В. Ясній, Г.Т. Сулим, В.А. Осадчук), представлений Інститутом прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача Національної академії наук України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Сулим Г.Т.* Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування. — Львів: Сполом, 2007. — 480 с.
2. *Дмитрах І.М., Панасюк В.В.* Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. — Львів: ФМІ, 1999. — 341 с.
3. *Кир'ян В.І., Осадчук В.А., Николишин М.М.* Механіка руйнування зварних з'єднань металокомпозитів. — Львів: Сполом, 2007. — 320 с.
4. *Кит Г.С., Побережний О.В.* Нестационарные процессы в телах с дефектами типа трещин. — К.: Наук. думка, 1992. — 216 с.
5. *Кит Г.С., Хай М.В.* Метод потенциалов в трехмерных задачах термоупругости тел с трещинами. — К.: Наук. думка, 1989. — 283 с.
6. *Кушнір Р.М., Николишин М.М., Осадчук В.А.* Пружний та пружно-пластичний граничний стан оболонок з дефектами. — Львів: Сполом, 2003. — 320 с.
7. *Осадчук В.А.* Напряженно-деформированное состояние и предельное равновесие оболочек с разрезами. — К.: Наук. думка, 1985. — 224 с.
8. *Скальський В.Р., Андрейків О.Є.* Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. — Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2006. — 330 с.
9. *Сулим Г.* Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформованих твердих тіл з тонкими включеннями. — Львів: Дослід.-вид. центр НТШ, 2007. — 716 с.
10. *Ясній П.В.* Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість. — Львів: Світ, 1998. — 292 с.
11. *Mykhaskiv V.V.* Transient response of a plane rigid inclusion to an incident wave in an elastic solid // *Wave Motion*. — 2005. — V. 41, N 2. — P. 133–144.
12. *Mykhaskiv V.V., Khay O.M.* Interaction between rigid-disc inclusion and penny-shaped crack under elastic time-harmonic wave incidence // *Int. J. Solids Struct.* — 2009. — V. 46, N 3–4. — P. 602–616.
13. *Orynyak I.V., Radchenko S.A.* Analytical and numerical solution for an elastic pipe bend at in-plane bending with consideration for the end effect // *Int. J. Solids Struct.* — 2007. — V. 44, N 5. — P. 1488–1510.
14. *Orynyak I.V., Yakovleva Ye.S.* Application of the crack compliance method to long axial cracks in pipes with allowance for geometrical nonlinearity and shape imperfections (dents) // *Eng. Fract. Mech.* — 2008. — V. 75, N 14. — P. 4052–4065.
15. *Дмитрах І.М.* Фізико-хімічна механіка руйнування тіл з тріщинами: досягнення та перспективи // *Фіз.-хім. мех. мат.* — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 31–41.
16. *Dmytrakh I.M.* On corrosion fatigue initiation from notches and the local corrosion fracture approaches // *Notch Effects in Fatigue and Fracture*. — Kluwer, 2001. — P. 331–346.
17. *Dmytrakh I.M.* Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines // *Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines*. — Springer, 2008. — P. 99–113.
18. *Пат. № 23095А* Україна, G01N17/00. Спосіб оцінки схильності до водневої деградації конструкційних сплавів / В.Р. Скальський. — Опубл. 30.06.1998; Бюл. № 3.
19. *Пат. № 23231* Україна, F16L57/00. Спосіб підвищення стійкості елементу конструкції до поширення тріщин / П.В. Ясній, В.Ю. Подкользін, Я.О. Ковальчук. — Опубл. 31.08.1998; Бюл. № 4.
20. *Пат. № 82808* Україна, G01N29/14. Спосіб експрес-оцінки водневої та корозійної тріщиностійкості матеріалів / В.Р. Скальський, З.Т. Назарчук, О.Є. Андрейків, Т.В. Селівончик. — Опубл. 12.05.2008; Бюл. № 9.
21. *Пат. № 38957* Україна, G01N1/32. Спосіб визначення розкриття вершини тріщини / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Ю.І. Пиндус та ін. — Опубл. 26.01.2009; Бюл. № 2.
22. *Пат. № 39834* Україна, G01N1/32. Спосіб визначення напружень елементів конструкцій / П.В. Ясній, П.О. Марущак, І.В. Коноваленко та ін. — Опубл. 10.03.2009; Бюл. № 5.
23. *Пат. № 39754* Україна, G01B5/00. Спосіб визначення розмірів зони пластичних деформацій / П.В. Ясній, П.О. Марущак, Ю.І. Пиндус та ін. — Опубл. 30.06.2009; Бюл. № 5.
24. *ДСТУ 4227:2003.* Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки / Л. Лобанов, М. Новиков, А. Лебедев та ін. — Чинний від 01.12.2003.
25. *ДСТУ НБВ.2.3-21:2008.* Магістральні трубопроводи. Настанови щодо визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами / І. Ориняк, А. Красовський, В. Махненко та ін. — Чинний від 01.01.2009.
26. *Назарчук З.Т., Кошовий В.В., Скальський В.Р. та ін.* Неруйнівний контроль і технічна діагностика // *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Т. 5. — Львів: ФМІ, 2001. — 1134 с.
27. *Луцко Й.Й., Сулим Г.Т., Кир'ян В.І.* Механіка руйнування мостових елементів конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності // *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Т. 6. — Львів: Каменярь, 2004. — 888 с.
28. *Дмитрах І.М., Вайнман А.Б., Стащук М.Г., Тот Л.* Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування // *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Т. 7. — К.: Академперіодика, 2005. — 378 с.
29. *Никифорчин Г.М., Поляков С.Г., Черватюк В.А. та ін.* Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів // *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Т. 11. — Львів: Сполом, 2009. — 504 с.

Стаття надійшла 01.11.2012 р.

Р.М. Кушнір¹, І.Н. Дмитрах²

¹ Інститут прикладних проблем механіки
і математики ім. Я.С. Пидстригача НАН України
ул. Научная, 3б, Львов, 79060, Україна

² Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенко
НАН України
ул. Научная, 5, Львов, 79060, Україна

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
И ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ТЕЛ
С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

В статті освітлена важлива для України наукова і прикладна проблема — розвиток теорії і розробка ефективних методів рішення нових задач статического і динамічного деформування, предельного рівноважия і розрахунок міцності просторових і тонкостінних (оболочечних і пластинчатих) елементів конструкцій з концентраторами напружень (тріщинами, тонкими і масивними вклученнями, отвєрстиями і т.п.) при різних видах силової і температурної навантаження з урахування впливу реальних робочих серед.

Ключевые слова: оболочечные и пластинчатые элементы конструкций, концентраторы напряжений, статические, динамические и температурные нагрузки, рабочие среды.

R.M. Kushnir¹, I.M. Dmytrakh²

¹ Pidstryhach Institute for Applied Problems
of Mechanics and Mathematics
of National Academy of Sciences of Ukraine
3b Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine

² Karpenko Physico-Mechanical Institute
of National Academy of Sciences of Ukraine
5 Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine

THEORY AND METHODS
OF STRESS STATE
AND STRENGTH CALCULATION
FOR DEFORMABLE SOLIDS
WITH STRESS CONCENTRATORS

The work highlights an important for Ukraine scientific and applied issue — development of the theory and effective methods for the solution of new problems of static and dynamic deforming, limit equilibrium and strength calculation of the spatial and thin-walled (shells and plates) structural elements with stress concentrators (cracks, thin and massive inclusions, holes, etc) under different modes of force and temperature loading and with taking into account an influence of real operating environments.

Keywords: shell and plate structural elements, stress concentrators, static, dynamic, and temperature loading, operating environments.