

УДК 539.3

**Ю.В. Банахевич**Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра зварювального виробництва, діагностики  
та відновлення металоконструкцій**ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ  
В ОКОЛІ КОРОЗІЙНИХ ДЕФЕКТІВ ТРУБ  
ПРИ ДІЇ ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ**

© Банахевич Ю.В., 2002

Наведено і проаналізовано результати дослідження концентрації напружень в околі дефекту матеріалу труби, яка навантажена внутрішнім тиском. Подано описання розробленого програмного забезпечення, яке реалізує розрахунковий метод скінченних елементів. Викладено результати експериментального дослідження напружень методом електротензометрії. Отримані результати експериментальних та розрахункових даних добре узгоджуються між собою.

**Represented the efforts concentration research results in zone pipe material defect, which is laden with internal pressure. Gives description developed software, which will bring calculation method to effect finite-elements method. Laid out the results of experimental efforts research by method electric strain measurement. Been accorded kind matching of experimental and calculation data.**

Сучасні підходи до діагностування металоконструкцій найчастіше базуються на відслідковуванні наявності та вивченні розвитку дефектів (якщо їх наявність є допустима) під час експлуатації труб. Швидкість розвитку цих процесів у загальному випадку визначається інтенсивністю навантажень, де параметрами є величина і тривалість навантажень, їх частота (при циклічних діях) тощо. Специфічні фактори (температура, агресивність середовища і т.д.) лише інтенсифікують розвиток дефектів, особливо якщо ці дефекти є корозійного характеру.

Корозія металу є однією із головних причин виникнення аварійних ситуацій в трубопроводному транспорті. Причому на практиці рівномірна корозія (найменш небезпечний вид корозії, розвиток і наслідки якого легко прогнозуються) зустрічається рідко. В більшості, це локальні каверни, виразки, піттинг корозія [1]. На рис. 1 наведено деякі результати статистичного аналізу даних внутрішньотрубного діагностичного обстеження магістрального газопроводу “Івацевичі-Долина III нитка” на ділянці від компресорної станції “Ковель” до компресорної станції “Сокаль”. Результати обстежень проведені інтелектуальним поршнем фірми “H.Rosen Engineering GmbH” [2].

Зрозуміло, що пошкоджений навіть значною локальною корозією трубопровід втрачає свою роботоздатність не відразу, а має (залежно від ступеня небезпеки дефекту і швидкості корозійного процесу) деякий залишковий ресурс. Визначальною при цьому є величина напружень в околі дефектів, які підсумовують вплив усіх небезпечних факторів і можуть бути деякою кількісною характеристикою безпечної роботи трубопроводу.

Сучасний розвиток обчислювальної техніки дає змогу ефективно визначити розподіл напружень і деформацій в пружному континіумі чисельними методами, зокрема методом скінченних елементів (МСЕ)[3].

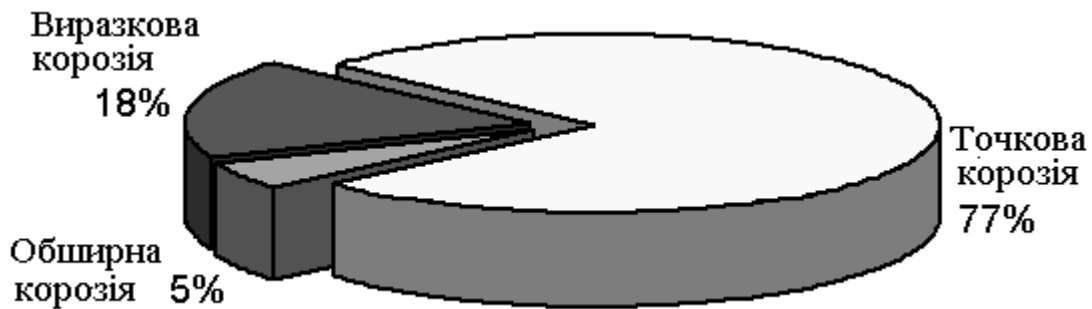


Рис. 1. Розподіл кількості корозійних пошкоджень у металі труби

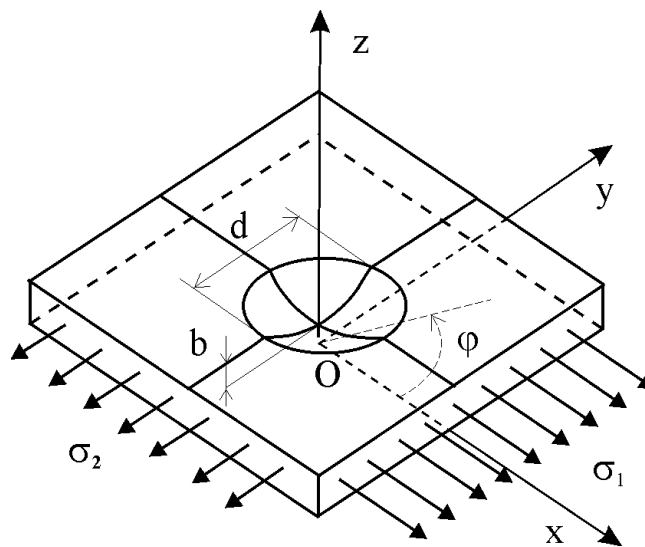


Рис. 2. Моделювання дефекту на поверхні труби

Нище наведено описання розв'язання такої задачі для випадку магістрального трубопроводу. Тут використано піваналітичну схему методу скінченних елементів, яка базується на розвиненні переміщень в ряд Фур'є по кутовій координаті та їх білінійній апроксимації на чотирикутних елементах в осьовому перерізі [4].

З урахуванням локальності збуреного напруженого стану в трубі, зумовленого наявністю дефекта, область збурення моделюється плоским шаром. Дефект моделюється півеліпсоїдом обертання (рис. 2).

Програмне забезпечення для персонального комп'ютера побудоване на об'єктно-орієнтованому принципі під ОС Windows. Для заданих геометричних параметрів шару та дефекту, механічних констант матеріалу і навантаження, програма автоматично генерує сітку методу скінченних елементів і розраховує:

- переміщення у вузлах сітки;
- напруження на елементах;
- максимум по елементах еквівалентних напружень за енергетичною теорією формозміни;
- напруження в точках границі області;
- напруження по заданих перерізах у вихідній прямокутній системі координат.

Програмне забезпечення дає змогу проводити розрахунок для довільної в осьовому перерізі форми дефекту заданням відповідної функції форми. Стандартно задані форми дефекту – півеліпсоїд обертання та циліндрична порожнина з еліпсоїдальним дном.

Схема ієрархії програми наведена нижче (рис.3). Програмне забезпечення складається з основної програми та 25 підпрограм, які можна розділити на такі групи:

- підпрограми стандартних числових методів:
  - розв’язування нелінійних рівнянь методом парабол – SolPar;
  - обчислення еліптичних інтегралів – Deli2;
  - прямого та оберненого ходу методу Гаусса розв’язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь для стрічкових матриць – DcmpBD, SlvBD.

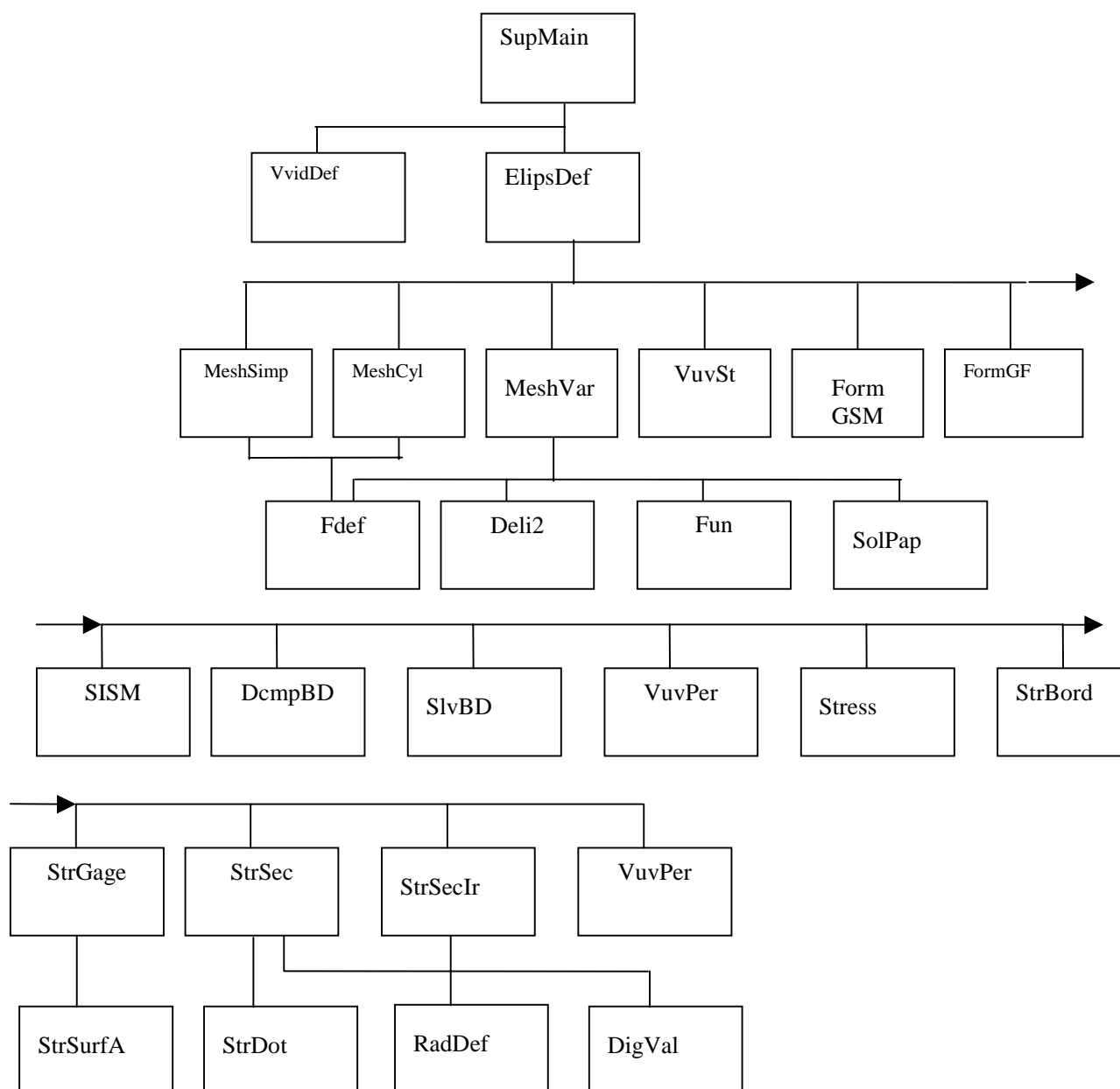


Рис.3. Схема ієрархії програми для розрахунку напружень у зоні дефекту

- підпрограми методу скінченних елементів:
  - опису геометрії дефекту, формування та виводу сітки скінченних елементів – Fdef, RadDef, ElipsDef, MeshSimp, MeshCyl, MeshVar, Fun, VuvSt,
  - формування системи лінійних алгебраїчних рівнянь та правої частини – FrmGSM, FormGF,
  - модифікації системи рівнянь для врахування кінематичних крайових умов – SISM,
  - розрахунку та виводу переміщень у вузлах – VuvPer, напружень на елементах – Stress, напружень у вузлах границі – StrBord, напружень тензометра StrDot, StrSurfA, StrGage, напружень по перерізах – StrSec, StrSecIr.
- підпрограма вводу вихідних даних – VvidDef.
- допоміжних підпрограм DigVal.

Головна програма SuPMain організує налаштування по організації розміщення файлів на диску (розпізнає поточну директорію, створює піддиректорію для вихідних результатів, перевіряє наявність вихідних файлів, формує шляхи для вихідних файлів) та запускає підпрограму вводу початкових даних VvidDef і головну підпрограму розрахунку ElipsDef.

Підпрограма ElipsDef є головною. Вона послідовно викликає інші підпрограми та виконує таке:

- Формує сітку методу скінченних елементів.
- Формує та розв'язує системи лінійних алгебраїчних рівнянь МСЕ.



Рис. 4. Інтерфейс програми обчислення розподілу напружень в околі дефекту

- Проводить розрахунок та вивід переміщень у вузлах.
- Проводить розрахунок та вивід напруження по елементах.
- Розраховує напруження на границі та інтегральні напруження тензодавача.

Організовує вивід файлів напружень по перерізах в прямокутній системі координат.

Розбиття вихідної області здійснюється на чотирикутні елементи. Залежно від розмірів дефекту в його околі передбачене згущення сітки.

Інтерфейс програми представлено на рис. 4. Як бачимо, програма дає змогу отримувати розподіл напружень в будь-якому перерізі дефекту. Окремо виконується візуалізація результатів з використанням 3D графіки.

Для перевірки правильності роботи програми здійснено тестовий розрахунок просторової задачі про напружений стан в пластині товщини  $H$  з отвором радіусом  $r_1$  при її однобічному розтязі (просторова задача Кірша). Для коефіцієнта концентрації напружень отримано значення 3,09. Точний розв'язок за даними праці [5] становить 3,08. Отже, вказане розбиття забезпечує точність визначення максимальних напружень до 1 %.

Окрім графічної візуалізації результатів обчислень, розроблена програма виконує формування файла даних, який розрізняється стандартними редакторами побудови графіків.

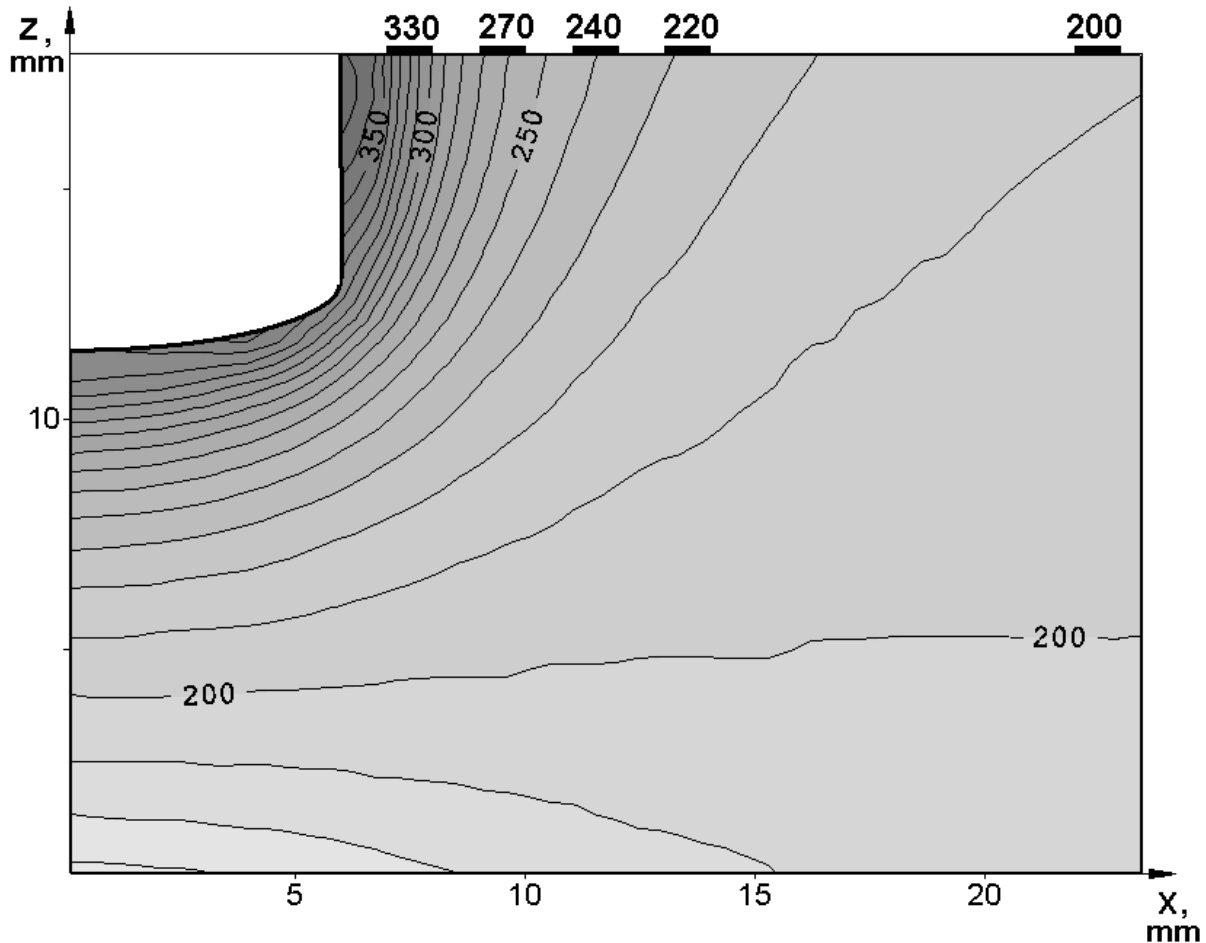


Рис. 5. Розподіл колових напружень в осьовому перерізі труби по діаметру дефекта:

$z$  – координата за товщиною труби,  $x$  – координата вздовж осі труби,

**200** – експериментально визначенні напруження

На рис. 5 зображено ізолінії колових (для труби) напружень в осьовому перерізі труби по діаметру дефекта (виражені в МПа). Експериментальна перевірка виконувалася на спеціально розробленому стенді. Він виготовлений з труби зовнішнім діаметром 1020 мм та товщиною стінки 18мм, яка закрита з обох боків півсферичними днищами. На поверхні труби було змодельовано дефект у вигляді циліндричної порожнини з еліпсоїдальним дном. Діаметр циліндра 12 мм, висота 6 мм, більша піввісь еліпсоїда 6 мм, менша – 1,6 мм, тиск в трубі 7 МПа.

Для визначення напружень застосовувалися тензодавачі із робочою базою 1 мм (марка КФ 4ПІ-1-100-В-12), які кріпилися до поверхні спеціально розробленого та виготовленого стенда, згідно з відомими методиками [6]. Їх місце розташування показано на рис. 5 у вигляді прямокутників із вказаними величинами експериментально визначених напружень.

Як бачимо, із врахуванням того, що по поверхні давача відбувається інтегрування значень напружень отримано добре збігання експериментальних та розрахункових даних.

Отже, застосування методу скінчених елементів дає змогу ефективно визначити концентрацію напружень в області поверхневих дефектів магістральних трубопроводів.

Проведені теоретична (просторова задача Кірша) та експериментальна (застосування тензодавачів) перевірки показали, що необхідна точність для інженерних розрахунків напружень в околі концентраторів забезпечується.

Отримані під час обчислень дані можуть бути використані для прогнозування швидкості кородування матеріалу труби [7, 8] і для визначення її роботоздатності та довговічності.

1. Кичма А. О. Оцінка дефектів металу труб за результатами внутрішньотрубною дефектоскопії трубопроводів // Вісн. НУ "Львівська політехніка". – 2001. – № 434 – С. 58 – 61.
2. Banahevych Ju., Kichma A. Inside gas pipelines diagnostics in enterprice "Lvivtransgaz" by intelligence pistons // Materialy II Krajowej Konferencji Technicznej "Zarzadzanie ryzykiem w eksploatacji rurociagow". Plock, 27-28 maja 1999 r., s. 63-65.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 234 с.
4. Осадчук В. А., Банахевич Ю. В. Концентрація напружень у трубопроводі з поверхневою заглибиною у формі півеліпсоїда обертання // Фіз. – хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 2. – С. 95 – 103.
5. Савін Г.М., Тульчій В.І. Довідник з концентрації напружень. – К.: Вища школа, 1976. – 412 с.
6. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.И. Полухин, Н.А. Чиченев. – К.: Наукова думка, 1981. – 584 с.
7. Гумеров А.Г., Гумеров К.М., Росляков А.В. Разработка методов повышения ресурса длительно эксплуатирующихся нефтепроводов. – М.: ВНИИОНГ, 1991. – (Обзорная информация, Сер. "Транспорт и хранение нефти"). – 83 с.
8. Гутман Э.М., Зайнуллин Р.С., Шаталов А.Т. и др. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа. – М.: Недра, 1984. – 76 с.