

## ВІДГУК

офіційного опонента

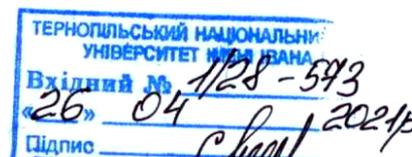
на дисертаційну роботу Козбур Галини Володимирівни

*«Прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом»*,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

**Актуальність теми дослідження.** Ключовим завданням при прогнозуванні міцності інженерних конструкцій є визначення максимальних допустимих навантажень, при перевищенні яких конструкція втрачає здатність чинити опір деформуванню та зазнає руйнування. При допустимості виникнення пластичних деформацій у матеріалі конструкції особливо важливою є коректна оцінка граничного навантаження, що передуює моменту втрати стійкості процесу пластичного деформування (ППД) з виникненням області локального деформування та наступним руйнуванням в'язкого характеру. Експериментально-лабораторне моделювання поведінки матеріалів в реальних експлуатаційних умовах із врахуванням усіх можливих комбінацій силових та інших чинників є складним завданням, оскільки вимагає пошкодження чи руйнування великої кількості зразків, створення і утримання вартісного обладнання. Тому більшість досліджень граничних станів зразків матеріалів за складного напруженого стану (СНС) зводиться до побудови критеріїв міцності, або умов еквівалентності. Такий підхід дозволяє моделювати багатоваріантні напружено-деформовані стани конструкцій та прогнозувати максимальні навантаження на основі обмеженої кількості дослідів. Загальним недоліком існуючих критеріїв є обмежене застосування для конкретних типів матеріалів та вузького діапазону видів напружених станів. На сьогоднішній день не існує теорії чи критерію, який би однозначно встановлював величини граничних навантажень для елементів конструкцій із врахуванням їх геометрії, виду СНС та властивостей матеріалу. Окрім того, розбіжності в розрахункових інженерних значеннях, отриманих аналітичним шляхом за нормативними документами і стандартами та з допомогою чисельних методів, наприклад, методу скінченних елементів, ускладнюють процедуру прийняття оптимальних рішень.

Розробка нових конструкційних матеріалів та необхідність врахування нових умов роботи конструкцій, підвищення запитів на економічність, ефективність конструкцій та безпеку в їх експлуатації постійно посилюють вимоги до точності та надійності розрахункових граничних значень показників напружено-деформованого стану. Тому удосконалення аналітично-розрахункового підходу до прогнозування граничних станів зразків матеріалів за СНС і розрахунку на його основі граничних значень навантажень є актуальною інженерною та науковою задачею.



Розрахунок значень дійсних напружень, які виникають при рівномірному пластичному деформуванні конструкційних елементів аж до початку локалізації деформацій дозволить виносити у більшій мірі обґрунтовані рішення щодо безпеки експлуатації конструкцій, удосконалити підхід до визначення реалістичного коефіцієнта запасу при проектуванні інженерних конструкцій, зменшити матеріаломісткість конструкцій, що критично важливо для деяких галузей з технічної точки зору, та економічно важливо для господарського комплексу в цілому.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації виконувалось у рамках науково-дослідних держбюджетних тем у Тернопільському національному технічному університеті імені І. Пулюя «Математичні моделі і методи аналізу залишкового ресурсу пружно-пластичних тіл з концентраторами напружень складної форми» (2012 р., № д. р. 0112U002201) та «Створення нового покоління методів фрактодіагностування матеріалів і конструкцій на основі використання нейронних мереж» (2020 р., № д. р. 0119U001323).

**Мета роботи** полягає у розробці аналітичної методики прогнозування граничного стану металевих елементів конструкцій типових геометричних форм за пластичного деформування двовісним розтягом при статичному навантаженні із врахуванням впливу їх геометрії.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

– розроблено новий метод побудови узагальненої кривої деформування через уведення еквівалентних напружень та деформацій на основі узагальнення класичних підходів та запропоновано методику знаходження параметра  $p$  як сталої фізико-механічних властивостей матеріалу, що найкраще узгоджує криву з результатами випробувань;

– уперше отримано аналітичні залежності для знаходження дійсної границі міцності в умовах в'язкого руйнування конструкційних елементів типових геометричних форм за плоского напруженого стану;

– розроблено та науково обґрунтовано новий метод прогнозування граничних станів тонкостінних оболонок, що комплексно враховує вид напруженого стану, фізико-механічні властивості матеріалу та геометрію навантажених елементів;

– уперше створено та реалізовано інженерну методику розрахунку граничних навантажень для тонкостінних труб, виконаних з різних типів металевих пластичних матеріалів, за одночасної дії внутрішнього тиску та розтягу.

**Практична цінність роботи.** Запропонована методика знаходження граничних значень дійсних напружень дає можливість прогнозувати міцність тонкостінних посудин під тиском (газопроводи, газові балони, колектори парогенераторів, резервуари, тощо, в машино-, авіабудуванні, хімічній, харчовій, енергетичній та інших галузях промисловості); встановлювати допустимий рівень навантажень та обирати реалістичний коефіцієнт запасу; приймати оптимальні

інженерно-конструкторські рішення на етапах проектування та експлуатації елементів конструкцій; підвищити ефективність та безпеку використання трубопровідних та зберігаючих систем оболонкового типу. Отримані в роботі результати досліджень (методику розрахунку граничних навантажень зразків металевих матеріалів та комп'ютерну програму, що реалізує розрахунок) впроваджено у виробництво підприємством ТДВ «Булат» (акт впровадження № 03/12 від 03.12.2020 р.).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації і їх достовірність та новизна.**

Обґрунтованість наведених в дисертації наукових положень та висновків забезпечується коректністю постановки задач досліджень, виборі адекватних моделей досліджень, опрацюванні недоліків та переваг існуючих методик прогнозування міцності конструкційних матеріалів за складного напруженого стану, сучасними математичними методами обробки їх результатів, використанням апробованих положень механіки деформівного твердого тіла, механіки руйнування.

**Оцінка змісту дисертації.**

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 136 найменувань та 6 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки, з них основного тексту – 126 сторінок, додатків – 12 сторінок. Дисертація містить 51 рисунок та 10 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність та важливість вирішення наукової задачі прогнозування міцності елементів конструкцій з металевих матеріалів, для яких допускається пластичне деформування, за складного напруженого стану; визначено об'єкт і предмет дослідження. Сформульовано мету роботи, визначено задачі, які необхідно вирішити для досягнення мети. Охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність, наведено дані про апробацію одержаних здобувачем результатів роботи та їх висвітлення в наукових публікаціях.

У **першому розділі** здійснено огляд наукових праць, в яких висвітлені аналітичні та розрахункові підходи до знаходження реальної границі міцності конструкційних матеріалів. Переважна більшість запропонованих рішень не враховує фізико-механічні властивості матеріалів, вид напруженого стану та фактичні розміри навантажених конструкційних елементів у комплексі, що унеможлиблює точне прогнозування граничних дійсних напружень та реальних навантажень в момент втрати стійкості ППД. Це стало підставою для формулювання мети та задач дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** присвячено побудові узагальненої кривої деформування, яка б узгоджувалась з класичними підходами та водночас враховувала деформаційні особливості реальних конструкційних матеріалів. Розроблено методику отримання параметра ( $p$ ), який інтегрально враховує фізико-механічні

властивості матеріалу та найкраще узгоджує узагальнену криву деформування з дослідними даними.

У **третьому розділі** сформульовано умови досягнення дійсної границі міцності у навантажених конструкційних елементах з врахуванням їх геометрії та виду напруженого стану. Розглянуто конструкційні елементи чотирьох типових форм: смугу, пластину, тонкостінні циліндр та осесиметричну оболонку. Аналітичні вирази отримано з урахуванням відносних деформацій та умов нестисливості.

**Четвертий розділ** присвячено розробці методу оцінювання граничного стану конструкційних елементів різної геометрії з класу тонкостінних оболонок для різних видів СНС. Виклад методики здійснено для тонкостінного циліндра за комбінованого навантаження внутрішнім тиском та осьовим розтягом ( $k=0,5..2$ ).

Запропоновано алгоритм методу прогнозування границі міцності тонкостінного циліндра із днищами, навантаженого внутрішнім тиском  $q$  та осьовим розтягом  $N$ , та визначення граничних значень силових факторів.

В **п'ятому розділі** подано опис практичної реалізації інженерної методики розрахунку границі міцності металів за СНС для тонкостінних циліндричних труб, виготовлених із двох конструкційних матеріалів: сталі 45 та сталі 10ГН2МФА.

Виявлено, що збільшення показника тонкостінності удвічі (від 0,08 до 0,16) для труби із сталі 45 зменшує рівень максимальних розрахункових граничних колових напружень (при  $k=0,6$ ) на 4-5%, для труби із сталі 10ГН2МА – на 1-3%, що підтверджує недоцільність покращення міцнісних характеристик елементів конструкцій лише за рахунок збільшення їх масивності. Дещо занижені значення розрахункових дійсних напружень для сталі 10ГН2МФА зумовлені накопиченими похибками, зокрема, на етапі оцифрування первинних кривих деформування, наданих в першоджерелі.

Розроблена методика дозволила визначати максимальні навантаження та оптимальні співвідношення товщина/діаметр труби для забезпечення її несівної здатності, прийняття оптимальних рішень щодо коефіцієнта запасу та реалізації ефективного співвідношення «вага–міцність» при заданому комбінованому навантаженні внутрішнім тиском та розтягом.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота є завершеною науковою роботою, за структурою, мовою і стилем написання відповідає вимогам МОН України, які ставляться до кандидатських дисертацій.

**Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації, аналіз автореферату.**

За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 21 наукову працю. Серед 11 наукових статей – 2 статті у закордонному науковому періодичному виданні іншої держави, яке включене до міжнародної наукометричної бази Scopus; 9 статей у наукових фахових виданнях України, серед яких 3 – у виданнях,

включених до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus. Опубліковано 9 тез доповідей та наукових праць в матеріалах наукових та науково-технічних конференцій, серед яких 7 – у міжнародних. В рамках дисертаційного дослідження отримано свідоцтво про авторське право на комп'ютерну програму. Основні наукові положення і висновки, які представлені в дисертації та авторефераті, ідентичні між собою. Автореферат повністю відображає актуальність роботи, зміст і суть одержаних наукових результатів, їх практичне значення, детально виокремлює особистий внесок здобувача та демонструє апробацію результатів. Запозичень та плагіату у дисертації немає.

**Проте, є низка зауважень по дисертації та автореферату, зокрема:**

1. Так як використання схеми Консідера, лягло в основу одного з основних положень дисертації щодо обґрунтування підходу до розрахунку дійсної границі міцності, то у п.1.3 слід було навести короткий аналіз літературних джерел, які стосуються використання цього підходу, його удосконалення та достовірності результатів, отриманих таким методом іншими дослідниками.
2. «Графік швидкості знеміцнення» на стор. 37 точніше було б назвати «графік інтенсивності знеміцнення», оскільки він характеризує залежність втрати міцності по мірі деформування.
3. Уведення параметра  $p$  в п.2.1 як інтегральної характеристики матеріалу фактично відображає встановлену дисертанткою концентричність розташування поверхонь текучості у просторі головних напружень, побудованих для різних рівнів досягнутих пластичних деформацій, що і лягло в основу побудови єдиної кривої деформування. На цьому слід було акцентувати більше уваги в розділі.
4. Дисертанткою використовуються дані експерименту для «сталі 0,37% С» (стор. 46, 50, 53 і т.д. за текстом дисертації). За хімічним складом це, ймовірно, відповідає марці сталі «сталь 40» (згідно з ДСТУ 7809:2015). Вважаю, що було б коректним використати в тексті марку матеріалу наприклад, «сталь 40» чи іншу, так як властивості кожної марки сталі визначаються не лише вмістом вуглецю а й іншими компонентами (домішками, легувальними елементами тощо).
5. Зауваження щодо стилістики та дотримання вимог граматики викладу тексту дисертації:
  - на стор. 6 у другому абзаці одне речення займає 12 рядків, що суттєво ускладнює сприйняття інформації, викладеної в ньому. Його слід було розбити на кілька речень або представити у вигляді переліку;
  - у тексті дисертації вживаються терміни «узагальнена крива деформування» та «узагальнена діаграма деформування», в одному контексті. У другому випадку, коли мається на увазі діаграма як графічний матеріал, слід було б вживати термін «діаграма узагальненої кривої деформування»;
  - в останньому абзаці п.1.3 речення «Врахування фізико-механічних властивостей матеріалу (зокрема, характер зміцнення), виду напруженого стану та геометрії конструкційних елементів значно розширити область застосування описаного підходу» слід замінити на «Врахування фізико-механічних

властивостей матеріалу (зокрема, характер зміцнення), виду напруженого стану та геометрії конструкційних елементів дає можливість значно розширити область застосування описаного підходу»;

- у роботі слід було б використовувати терміни «обґрунтування», замість «обґрунтування» (стор. 6, 19, 48) та «системи зберігання» замість «зберігаючі системи» (стор. 23), «найпоширеніших» замість «найбільше поширених» (стор. 37).

Слід зазначити, що усі відмічені недоліки не знижують високого наукового рівня та практичної цінності результатів дисертаційного дослідження здобувача.

### **Загальні висновки**

Загалом, дисертаційна робота Козбур Галини Володимирівни на тему: «Прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом», яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу наукову задачу з удосконалення аналітико-розрахункового підходу до прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом, що має істотне значення при проектуванні та експлуатації конструкцій з метою зменшення їх матеріалоемності, підвищення ефективності використання та рівня безпеки.

Дисертаційна робота за ступенем актуальності обраної теми, обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизни, повноти викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутності порушень академічної доброчесності, цілком відповідає пунктам 9-12 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567 (зі змінами), а її автор, Козбур Галина Володимирівна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент:

доцент кафедри зварювання  
Івано-Франківського національного  
технічного університету нафти і газу,  
кандидат технічних наук, доцент

Р.Т. Біщак

Підпис Біщака Р.Т. засвідчую  
вчений секретар  
Івано-Франківського національного  
технічного університету нафти і газу,  
кандидат технічних наук, доцент



В.Р. Процюк