

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, завідувача кафедри медичної фізики діагностичного та лікувального обладнання ТНМУ ім. І. Я. Горбачевського,

доцента **Рудяка Юрія Ароновича**

на дисертаційну роботу **Козбур Галини Володимирівни** “Прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом”, представлену до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

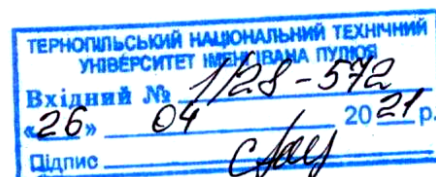
Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої наукової задачі удосконалення аналітико-розрахункового підходу до прогнозування граничних станів елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом. Якщо при експлуатації в елементах конструкцій допускається виникнення пластичних деформацій, то особливо важливою є коректна оцінка граничного навантаження, що передуює моменту втрати стійкості процесу пластичного деформування з виникненням області локального деформування та наступним в’язким руйнуванням. Існуючі моделі та методи не враховують фізико-механічні особливості матеріалу, вид напруженого стану та фактичну геометрію навантажених елементів конструкцій, що обмежує можливість їх застосування. Водночас постійне підвищення вимог до зменшення матеріаломісткості, покращення функціональної ефективності конструкцій та їх безпеки в експлуатації робить тему дисертаційного дослідження **актуальною**.

Загальна характеристика роботи

Представлена на опонування дисертаційна робота складається з анотації, змісту, вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі здійснено огляд існуючих критеріїв міцності пластичних матеріалів за складного напруженого стану. Найчастіше в інженерній практиці



використовують класичні підходи Мізеса та Треска. Критерії, які є їх узагальненням, показують краще узгодження з даними експерименту. Відповідно до двох класичних критеріїв міцності розглядають два підходи до побудови узагальненої кривої деформування матеріалу для відстеження напружено-деформованого стану матеріалу впродовж усього процесу навантаження. Побудова узагальненої кривої деформування значно звужує довірчу зону експериментальних точок, отриманих за різних видів складнонапруженого стану. Точне прогнозування границі міцності за розвинутих пластичних деформацій вимагає врахування фактичних розмірів навантаженого елемента та побудови дійсної узагальненої кривої деформування. Розрахунок граничних значень дійсних напружень в момент втрати стійкості процесу пластичного деформування за одновісного розтягу, який ґрунтується на використанні критерію Свіфта-Марціньяка та аналітичного співвідношення $\tilde{\sigma} = d\tilde{\sigma}/d\varepsilon$ між дійсними напруженнями та дотичним модулем в дійсних напруженнях, відомий як схема Консідера. Відомі дослідження, у яких для прогнозування граничного тиску в тонкостінних трубах запропоновано використовувати співвідношення $\tilde{\sigma} = \frac{1}{2}d\tilde{\sigma}/d\varepsilon$, що містить коригувальний множник $\frac{1}{2}$ біля дотичного модуля. Розрахункові граничні дійсні напруження, отримані згідно з таким співвідношенням, є значно меншими, ніж за одновісного розтягу, що підтверджується експериментально. У даній роботі ставилось завдання розробити методика визначення граничних значень дійсних напружень та реальних навантажень в елементах конструкцій типових форм за різних видів плоского напруженого стану, яка би враховувала як фізико-механічні властивості матеріалу, так і зміни фактичних розмірів при рівномірному пластичному деформуванні.

У другому розділі розроблено систему еквівалентних координат для аналітичного опису узагальненої діаграми деформування, яка узгоджується з класичними підходами та враховує результати експериментів. Запропонована феноменологічна модель узагальненої кривої деформування інтегрально враховує фізико-механічні властивості матеріалу через уведення параметра p . У часткових випадках еквівалентні напруження і деформації зводяться до класичних: при $p = 1$ отримуються формули для визначення найбільших дотичних напружень та кутових

деформацій τ_{\max} , γ_{\max} , при $p = 2$ – інтенсивності напружень і деформацій σ_i , ε_i . Розрахунки для експериментальних даних низки конструкційних матеріалів показали, що існує таке розрахункове значення параметра p , для якого можна побудувати узагальнену криву деформування з найменшим показником відносного розсіювання точок. В розділі отримано оптимальні значення параметра p для рівняння регресії узагальнених кривих деформування та відповідні показники якості за результатами кількох найпростіших дослідів.

У третьому розділі на основі принципу максимуму навантаження отримано аналітичні умови досягнення дійсної границі міцності для конструкційних елементів типових геометричних форм (смуги, пластини, тонкостінного циліндра та тонкостінної осесиметричної оболонки) за найпростіших типів навантажень. Отримано два види залежностей: граничні умови, графіками яких є січні дійсних діаграм деформування, та дотичні модулі. Дотичні модулі використано при конструюванні узагальненої умови втрати стійкості процесу пластичного деформування тонкостінної труби за комбінованого навантаження внутрішнім тиском та розтягом. Виконано аналіз впливу виду напруженого стану та геометрії конструкційних елементів на граничні значення дійсних напружень в момент утворення місцевих деформацій. Аналітично підтверджено, що ресурс міцності тонкостінного циліндра є найменшим за навантаження лише внутрішнім тиском; незначне довантаження осьовим розтягом збільшує межі дійсних розрахункових колових напружень для труби, але зменшує їх для осесиметричної тонкостінної оболонки додатної гаусівської кривизни.

У четвертому розділі розроблено метод прогнозування граничних станів тонкостінних оболонок, одночасно навантажених внутрішнім тиском та осьовим розтягом, із врахуванням їх геометрії та фізико-механічних властивостей конструкційного матеріалу. Отримано формулу для знаходження дійсних напружень на початку локалізації деформацій. Формула містить коригувальний множник, який враховує фізико-механічні властивості матеріалу, вид напруженого стану та геометрію елемента. Отримано розрахункові значення коригувального множника для сталей чотирьох марок (сталь 45, 10ГН2МФА, 15Х2НМФА, Х16Н6).

Розмах значень коригувального множника для кожної з чотирьох марок сталей становив близько 0,4, усі значення належать інтервалу [0,2; 0,9].

У п'ятому розділі реалізовано інженерну методику розрахунку границі міцності тонкостінних циліндричних труб, виготовлених з різних типів пластичних конструкційних матеріалів. Для двох марок сталей (вуглецевої сталі 45 та легованої сталі 10ГН2МФА) показано збільшення розрахункового порогу міцності труби, навантаженої тиском, за незначного додаткового навантаження осьовим розтягом. Аналіз результатів показав, що можливе встановлення оптимального балансу між фактичною геометрією елемента та навантаженням, яке дозволяє вирішити задачу пошуку оптимального співвідношення «вага-міцність», важливого для практичних застосувань в авіа-, ракето- та машинобудуванні.

У висновках висвітлено отримані основні наукові результати дисертаційної роботи.

У додатках наведено результати знаходження параметра p та рівняння узагальненої кривої деформування для серії пластичних конструкційних матеріалів; зведені дерева рішень для отримання граничних умов та дотичних модулів для зразків різної геометрії; виведення формули для знаходження дотичного модуля до дійсної узагальненої кривої деформування; список наукових публікацій та наукових конференцій, в яких дисертантка брала участь; акт впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Новизна наукових положень, оцінка обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

В дисертаційній роботі 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, яка найкраще узгоджує криву з результатами випробувань.

На основі критерію втрати стійкості процесу пластичного деформування та принципу максимуму навантаження вперше встановлено аналітичні залежності для знаходження дійсної границі міцності конструкційних елементів типових

геометричних форм за плоского напруженого стану; на основі отриманих залежностей розроблено та науково обґрунтовано новий метод прогнозування граничних станів тонкостінних оболонок за плоского напруженого стану із врахуванням їх геометрії та фізико-механічних властивостей матеріалу.

Уперше розроблено та реалізовано інженерну методику розрахунку граничних навантажень для тонкостінних труб, виконаних з різних типів металевих пластичних матеріалів, які одночасно навантажуються внутрішнім тиском та розтягом.

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів забезпечується використанням базових положень механіки деформівного твердого тіла та коректним застосуванням відповідного аналітичного апарату; узгодженням отриманих аналітичних форм, розрахунків та висновків у часткових випадках з відомими результатами теоретичних та експериментальних досліджень інших авторів; прийняттям обґрунтованих фізико-механічних моделей.

Теоретичне значення та практична цінність

Запропонована методика знаходження граничних значень дійсних напружень в конструкційних елементах оболонкового типу, що допускають появу пластичних деформацій при експлуатації, дає можливість встановлювати максимально допустимий рівень навантажень та обирати реальний коефіцієнт запасу. Отримані в роботі результати є актуальними в контексті стійкої тенденції до підвищення тиску в трубах газопровідних систем. Вагомим практичним результатом є встановлення збільшення порогу міцності тонкостінного циліндра під тиском у випадку незначного довантаження осьовим розтягом. Розроблена методика враховує зміну геометрії навантажених елементів оболонкових конструкцій, що дозволяє вирішити задачу пошуку оптимального співвідношення між вагою конструкції та її несівною здатністю, що є важливим та актуальним для практичного застосування в авіа-, ракето- та машинобудуванні.

Можливість комплексно враховувати фізико-механічні властивості матеріалу, використаного при виготовленні елемента конструкції, його геометрію та вид навантаження дозволяє приймати оптимальні інженерно-конструкторські рішення

на етапах проектування та експлуатування елементів оболонкового типу, підвищити їх робочий ресурс та запобігти можливим аварійним ситуаціям.

Отримані в роботі результати наукових досліджень (методику розрахунку граничних навантажень зразків металевих матеріалів та комп'ютерну програму для розрахунку) впроваджено у виробництво підприємством ТДВ «Булат», що займається виготовленням елементів металевих конструкцій.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях та їх апробація

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 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.

У повному обсязі дисертаційна робота представлялась та обговорювалась на науковому тематичному семінарі «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» ТНТУ ім. І. Пулюя (2020); науковому семінарі відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (2021).

Фахові видання, в яких опубліковано наукові праці, відповідають профілю спеціальності та дисертаційній роботі. Дані публікації в повній мірі відображають основні положення дисертації.

Зауваження та дискусійні положення, побажання

- 1) На ст. 44, 45 дисертації формули (2.3), (2.4) описують запропоновані автором вирази для еквівалентних деформацій та еквівалентних напружень. Ці формули описують, по суті, запропонований критерій граничного стану. Не розшифровано, яким саме чином запропоновано формули, що містять

параметр p . Можливо це найбільш узагальнена форма, яка при певних значеннях параметра p призводить до класичних критеріїв граничного стану, про що частково сказано в дисертації та авторефераті (ст. 6), але це не підкреслено ствердно.

- 2) Не зрозуміло, чому параметр p інтегрально враховує фізико-механічні властивості матеріалу, як стверджує автор (ст. 44, 53). Де тут фізична складова? Формули (2.3), (2.4) носять класичний механічний характер. Які саме інтегральні фізичні характеристики враховує параметр p ?
- 3) Рисунки 2.3, 2.4, 2.5, таблиці 2.1, 2.2 надають дані для визначення параметра p для трьох сталей (0,37 %С, сталі 45, сталі 15Х2НМФА). Автором сказано, що це сталі з різною залишковою пластичністю для одновісного розтягу. При цьому не надано повної інформації, чому для цієї групи експериментальних досліджень вибрано саме ці сталі, чи відображають отримані дані для розрахунку параметра p досить повну інформацію при аналізі саме цієї групи матеріалів, які були основні критерії чи логічні посилля зробити саме такий вибір групи досліджуваних матеріалів.
- 4) У табл. 3.1, 3.2 (ст.85) наведено значення сталих інтегрування для величин тонкостінності $\eta = h/R$ від 0,04 до 0,08 (для аналізу впливу напруженого стану на граничні значення дійсних напружень взято середнє значення $\eta = 0,06$). На рис. 4.6 (ст. 101) наведена залежність коригувального множника за різних значень $\eta = h/R$. Тут взято діапазон для η від 0,08 до 0,16. З чим пов'язано збільшення η у два рази при обґрунтуванні нового методу прогнозування граничних станів оболонок?
- 5) На с. 106 надано інформацію, що випробування зразків відбувалось в Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України та Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, що, без сумніву, підтверджує об'єктивність, повноту та достовірність отриманих результатів. Але назви відповідних наукових закладів наведено не зовсім точно.
- 6) На рис. 5.10 – 5.12 (ст. 119 – 121) наведено залежності граничних значень дійсних напружень, граничних еквівалентних деформацій, граничних рівномірних деформацій від показника тонкостінності $\eta = h/R$ у діапазоні $\eta =$

0,08 – 0,16. Автором зроблено висновок про недоцільність покращення міцнісних характеристик елементів конструкцій лише за рахунок збільшення їх масивності (ст. 119). У висновку 6 до розділу 5 (с. 125) та у висновку 3 основних результатів та висновків до всієї роботи (с. 127) автор знову приводить таке заключення. Це дуже важливий висновок для авіа- та космічної техніки. Але наведені графіки не дають в акцентованому вигляді повної наочної деформації. Доцільно було б надати таку інформацію в табличному вигляді, для всіх п'яти видів сталей, що досліджувались в роботі, бажано у діапазоні $\eta = 0,04 - 0,16$, з чітким співвідношенням указаних залежностей.

- 7) Формули (2.3) і (2.4) описують критеріальні рівняння граничного стану, ефективність яких далі доведена при дослідженні деяких сталей. Не дано межі застосування запропонованих критеріальних рівнянь для різних матеріалів, що було би важливо, і тільки підсилило б вагу запропонованого підходу.
- 8) На ст. 20 сформульовано, що удосконалення аналітико-розрахункового підходу і прогнозування граничних станів зразків матеріалів за складного напруженого стану і розрахунку на його основі граничних значень навантажень є актуальною інженерною та науковою задачею. А в основних висновках (с. 126) зазначено, що вирішено актуальну наукову задачу. Має бути повна відповідність у формулюваннях.

Зауваження викладені до тексту дисертаційної роботи, форма та зміст автореферату – задовільні.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам МОНу та загальна оцінка роботи

Подана дисертаційна робота Козбур Г.В. “Прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом” є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій вирішено актуальну наукову задачу 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.

Зміст дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (технічні науки), за якою робота представлена до захисту. Результати та висновки дисертаційного дослідження відповідають меті та поставленим завданням. Автореферат та дисертація оформлені згідно чинних вимог МОН України. Автореферат дисертації за змістом повністю відповідає дисертаційній роботі.

Вважаю, що за актуальністю, рівнем наукової новизни, теоретичним значенням та прикладною цінністю дисертаційна робота “Прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом” відповідає чинним вимогам «Порядку присудження наукових ступенів...», затвердженого постановою КМУ № 567 від 24.07.2013 р. зі змінами, а її автор Козбур Галина Володимирівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент:

**доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри медичної фізики
діагностичного та
лікувального обладнання
Тернопільського національного
медичного університету
ім. І. Я. Горбачевського
МОЗ України**

Рудяк Ю. А.

Підпис доц. Ю.А. Рудяка засвідчую



Особистий підпис

засвідчую
завіряю

Заступник ректора з кадрових питань
Тернопільського національного
медичного університету