

0

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

КОЗБУР ГАЛИНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 539.3:539.4.01

**ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ
ЗА ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДВОВІСНИМ РОЗТЯГОМ**

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Шкодзінський Олег Ксаверович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
доцент кафедри автоматизації технологічних процесів та
виробництва

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Рудяк Юрій Аронович,
Тернопільський національний медичний університет
ім. І. Я. Горбачевського,
завідувач кафедри медичної фізики діагностичного та
лікувального обладнання;

кандидат технічних наук, доцент
Біщак Роман Теодорович,
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу,
доцент кафедри зварювання.

Захист відбудеться “ 7 ” _____ травня _____ 2021 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради **Д58.052.01** при Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя МОН України (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус 2, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56).

Автореферат розісланий “ 6 ” _____ квітня _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Б. Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору 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 скінчених 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 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 і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка аналітичної методики прогнозування граничного стану металевих елементів конструкцій типових геометричних форм за пластичного деформування двовісним розтягом при статичному навантаженні із врахуванням впливу їх геометрії.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. розробити систему еквівалентних координат для аналітичного опису узагальненої діаграми деформування, яка б узгоджувалась з класичними підходами та враховувала результати експериментів;
2. розробити алгоритм знаходження узагальненого параметра фізико-механічних властивостей матеріалу для побудови узагальненої кривої деформування;
3. встановити залежності для знаходження дійсної границі міцності для навантажених конструкційних елементів типових геометричних форм за плоского напруженого стану;
4. розробити та науково обґрунтувати метод прогнозування граничних станів тонкостінних оболонок за плоского напруженого стану із врахуванням їх геометрії;
5. створити інженерну методику розрахунку граничних навантажень для тонкостінних труб різної геометрії за одночасної дії внутрішнього тиску та розтягу.

Об'єктом дослідження є поведінка матеріалів за пружно-пластичного деформування в умовах складного напруженого стану.

Предметом дослідження є умови досягнення граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом (граничні дійсні напруження втрати стійкості процесу рівномірного пластичного деформування).

Методи дослідження. При вирішенні завдань дисертаційного дослідження було використано:

- кореляційно-регресійний аналіз для отримання рівняння узагальненої кривої деформування;
- критерій максимального навантаження та аналітичні методи інтегрування диференціальних рівнянь для виведення умов досягнення граничних станів конструкційних елементів типової геометрії;
- методологію побудови Консідера, графічний та наближений методи розв'язування рівнянь для прогнозування граничних станів конструкційних елементів за плоского напруженого стану.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційному дослідженні:

- розроблено новий метод побудови узагальненої кривої деформування через введення 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 оболонки, 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.

Отримали подальший розвиток:

- методи побудови узагальненої кривої деформування пластичних матеріалів;
- методи знаходження дійсних напружень, що виникають при рівномірному пластичному деформуванні навантажених конструкційних елементів аж до появи локальних деформацій;
- спосіб використання методології на основі схеми Консідера для визначення дійсної границі міцності пластичних ізотропних матеріалів за СНС.

Практичне значення одержаних результатів. 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.).

Особистий внесок здобувача. Основу дисертаційної роботи складають результати, отримані автором самостійно. Постановка мети та завдань, обговорення, аналіз результатів та можливостей їх практичного застосування проведені разом з керівником. Дисертанту належать виведення аналітичних залежностей методики, розробка алгоритму та реалізація з використанням комп'ютерної техніки. Наукові праці [4, 5, 10, 18] опубліковано дисертантом без співавторів. У наукових статтях зі співавторами дисертанту належать: розробка методики отримання узагальненої кривої деформування [1, 7, 8]; участь у постановці задач, вибір методів їх розв'язання [1–3, 6–9, 11], участь у розробці методики прогнозування міцності елементів різної геометрії [10] та її інженерної реалізації [11].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати, викладені у дисертації, доповідались і обговорювались на науковій конференції ТДТУ (Тернопіль, 2004); Всеукраїнській науковій конференції ТДТУ (Тернопіль, 2009); Міжнародній конференції «Сучасні проблеми механіки» ЛНУ ім. І. Франка (Львів, 2009); Міжнародній науково-технічній конференції ТНТУ (Тернопіль, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті І. Пулюя (Тернопіль, 2018); Міжнародній конференції МЦНД «Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень» (Луцьк, 2020); VII Міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 2020); Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки» (Дніпро, 2020); II Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Новітні технології в освіті, науці та виробництві» (Покровськ, 2020).

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).

Публікації. 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 [7, 10]; 9 статей у наукових фахових виданнях України [1–6, 8, 9, 11], серед яких 3 – у виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus [5, 8, 9]. 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.

Структура 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

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.

Для прогнозування дійсних напружень в навантаженому елементі в момент локалізації деформацій (шийкоутворення за одновісного розтягу) використовують

діаграму деформування в дійсних напруженнях $\tilde{\sigma}(\varepsilon)$ та критерій втрати стійкості процесу пластичного деформування Свіфта–Марціньяка. Для більшості матеріалів в момент втрати стійкості ППД прикладене навантаження, а відповідно умовне напруження σ , досягає свого максимуму (σ^e). Відповідність максимального навантаження початкові локалізації деформацій була прийнята в роботах А. Надаї, Я. Фрідмана, Р. Хілла, А. Камінського, В. Бастуна, В. Дегтярьова та ін. Цей підхід розвинуто А. Лебедевим, Ф. Гігіняком, О. Шкодзінським. Два підходи для знаходження граничних значень дійсних напружень в момент шийкоутворення за одновісного розтягу, що використовують дотичний модуль $d\tilde{\sigma}/d\varepsilon$, відображено на рис. 1.

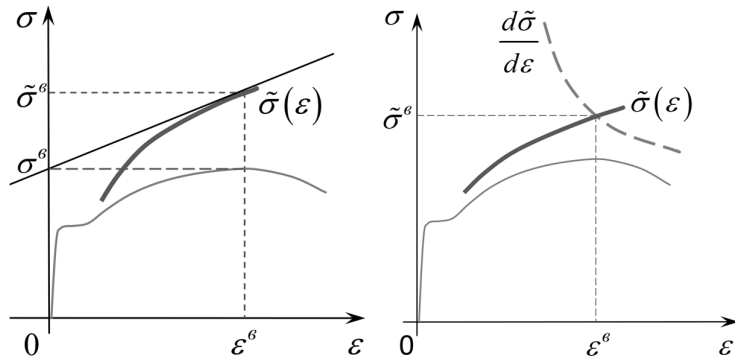


Рис. 1. Два підходи до знаходження дійсних напружень в момент шийкоутворення (схема Консідера)

Прогнозуванню граничного внутрішнього тиску в трубах та ємностях присвячено роботи W. Cooper, N. Svensson, M. Law, X. Zhu, M. Yu, G. Stewart, ін. Вивченню напружено-деформованого стану тонкостінних труб та ємностей в умовах комбінованого навантаження внутрішнім тиском та осьовим розтягом присвячено роботи В. Дільмана, В. Дегтярьова, Б. Ковальчука, Дж. Коллінза, М. Hillier,

D. Urdike та ін. Переважна більшість запропонованих рішень не враховує фізико-механічні властивості матеріалів, вид напруженого стану та фактичні розміри навантажених конструкційних елементів у комплексі, що унеможливує 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.

Концентричність граничних діаграм плинності, побудованих за дослідними даними з двовісного розтягу зразків металевих конструкційних матеріалів для різних допусків (від 0,5% до 4%) на залишкову деформацію, підтвердила можливість побудови єдиної узагальненої кривої деформування. Для її побудови уведено систему еквівалентних напружень і деформацій:

$$\sigma_{eq} = \frac{p}{2} \left[\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|^p + |\sigma_2 - \sigma_3|^p + |\sigma_1 - \sigma_3|^p}{2} \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{p}{2(p+1)} \left[\frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|^p + |\varepsilon_2 - \varepsilon_3|^p + |\varepsilon_1 - \varepsilon_3|^p}{1/2} \right]^{\frac{1}{p}}. \quad (2)$$

У часткових випадках еквівалентні напруження (1) та деформації (2) зводяться до максимальних дотичних напружень та кутових деформацій ($p=1$) або інтенсивностей напружень та деформацій ($p=2$). Параметр p є мірою відхилення дослідних даних від класичних узагальнених кривих.

Для визначення параметра p використано дані дослідів з двовісного розтягу металевих пластичних матеріалів. Порівнювались діаграми розсіювання дослідних даних, побудовані в системі координат (1), (2) за різних значень p . Як функціонал якості вибрано коефіцієнт кореляції Пірсона r , як функціонал помилок – коефіцієнт варіації V . Результати для трьох марок сталей (сталі 0,37% С, сталі 45, 15Х2НМФА) з різною залишковою пластичністю за одновісного розтягу ($\varepsilon^s \approx 14\%, 10\%, 7\%$ відповідно) показано на рис. 2.

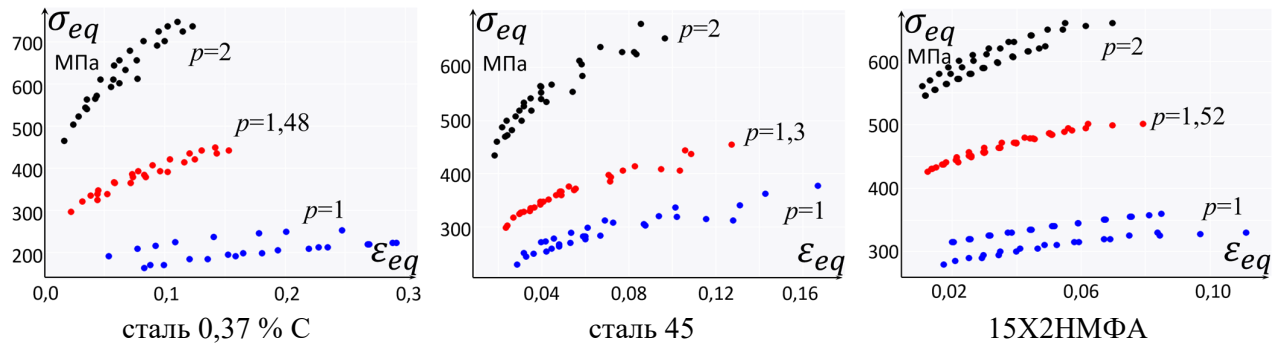


Рис. 2. Діаграми розсіювання дослідних даних в координатах $\sigma_{eq} \sim \varepsilon_{eq}$ для різних p

Значення параметра p , за яких коефіцієнт варіації мінімальний, близькі до значень, отриманих за умови максимуму коефіцієнта кореляції Пірсона (табл. 1).

Табл. 1. Наближені значення параметра p та показники якості моделі (1), (2)

Марка сталі	r_{\max}	$p(r_{\max})$	V_{\min}	$p(V_{\min})$
сталь 0,37%С	0,970	1,48	3,81%	1,50
сталь 45	0,968	1,30	3,44%	1,32
15Х2НМФА	0,975	1,52	1,03%	1,39

Для апроксимації ділянки зміцнення кривої деформування в еквівалентних координатах використано степеневу модель $\sigma_{eq}^* = A(\varepsilon_{eq})^B$.

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.

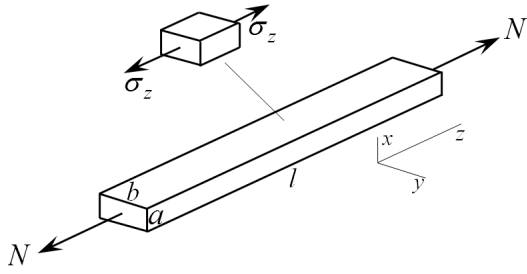


Рис. 3. Розрахункова схема
одновісного розтягу смуги

відносних осьових деформацій аж до моменту шийкоутворення:

$$\tilde{\sigma}_z^e = \sigma_z^e (1 + \varepsilon_z^e). \quad (4)$$

Дотичний модуль до діаграми розтягу:

$$\frac{d\tilde{\sigma}_z}{d\varepsilon_z} = \frac{\tilde{\sigma}_z}{1 + \varepsilon_z} \quad \text{або} \quad \frac{d\tilde{\sigma}_z}{d\varepsilon_z} = \sigma_z^e. \quad (5)$$

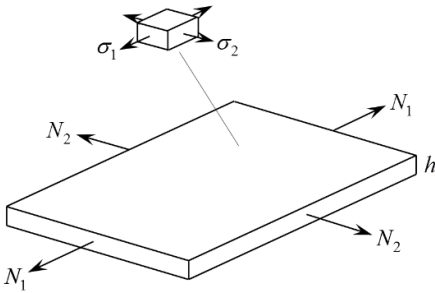


Рис. 4. Розрахункова схема
двовісного розтягу пластини

розтягом N , прийнято основні припущення теорії тонкостінних оболонок.

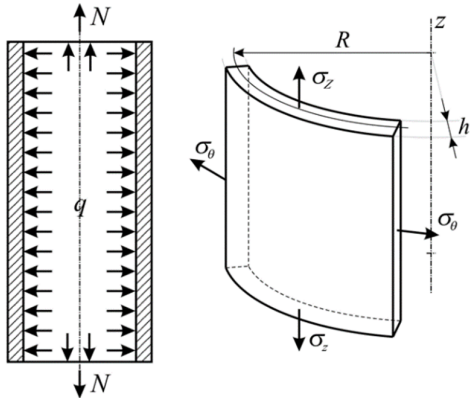


Рис. 5. Розрахункова схема навантаження
тонкостінного циліндра внутрішнім тиском
та розтягом

Умови максимуму навантаження $dN=0$ для одновісного розтягу смуги (рис. 3) та нестисливості матеріалу $(1+\varepsilon_x)(1+\varepsilon_y)(1+\varepsilon_z)=1$ приводять до диференціального рівняння

$$\frac{d\tilde{\sigma}_z}{\tilde{\sigma}_z} = \frac{d\varepsilon_z}{1 + \varepsilon_z}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – відносні деформації. Дійсні напруження $\tilde{\sigma}_z$ залежать лінійно від рівня

У випадку двовісного розтягу пластини силами N_1 і N_2 (рис. 4) з умови максимуму навантаження $dN_1=0$ (або $dN_2=0$) отримано аналогічні результати. Тут і далі приймалися умови простого навантаження $\sigma_1/\sigma_2=k$. Тоді $\varepsilon_1/\varepsilon_2=n$, $n=(2k-1)/(2-k)$.

При розгляді тонкостінного циліндра (рис. 5) та тонкостінної осесиметричної оболонки додатної гаусівської кривизни, навантажених внутрішнім тиском q та осьовим

розтягом N , прийнято основні припущення теорії тонкостінних оболонок.

З умови $dq=0$ отримано дотичний модуль до дійсної кривої деформування $\tilde{\sigma}_\theta(\varepsilon_\theta)$:

$$\frac{d\tilde{\sigma}_\theta}{d\varepsilon_\theta} = \tilde{\sigma}_\theta \frac{2(1+\varepsilon_\theta)(1+n\varepsilon_\theta) + n(1+\varepsilon_\theta)^2}{(1+\varepsilon_\theta)^2(1+n\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2R}} \quad (6)$$

та граничну умову для визначення дійсних колових напружень в момент локалізації деформацій:

$$\tilde{\sigma}_\theta = C_\theta \left[(1+\varepsilon_\theta)^2(1+n\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2R} \right]. \quad (7)$$

З умови $dN=0$ отримано дотичний модуль до кривої деформування $\tilde{\sigma}_z(\varepsilon_z)$:

$$\frac{d\tilde{\sigma}_z}{d\varepsilon_z} = \frac{\left(1 - \frac{1}{2k} + \frac{h}{2kR}\right) \frac{1}{1+\varepsilon_z} + \frac{h}{2knR} \frac{1}{1+\varepsilon_z/n}}{1 - \frac{1}{2k} + \frac{h}{4kR}} \tilde{\sigma}_z \quad (8)$$

та граничну умову для визначення дійсних осьових напружень в момент втрати стійкості ППД:

$$\tilde{\sigma}_z = C_z \left[(1 + \varepsilon_z)^{2\left(2k-1+\frac{h}{R}\right)} \left(1 + \frac{1}{n} \varepsilon_z\right)^{2\frac{h}{R}} \right]^{\frac{1}{4k-2+\frac{h}{R}}} \quad (9)$$

Умови (7) та (9) графічно зображено січними дійсних кривих деформування $\tilde{\sigma}_\theta(\varepsilon_\theta)$, $\tilde{\sigma}_z(\varepsilon_z)$, що дозволило визначити дійсні напруження, спричинені внутрішнім тиском або осьовим розтягом за локалізації деформацій (рис. 6).

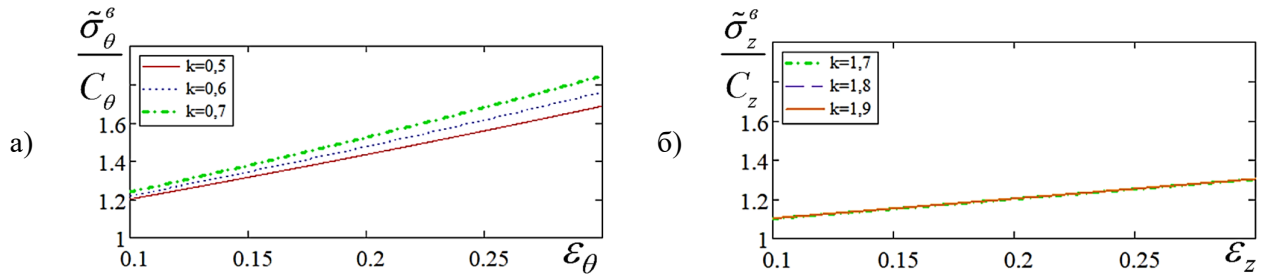


Рис. 6. Графічне зображення граничних умов (7) та (9) за різних k

Аналіз рис. 6а свідчить про збільшення граничних розрахункових колових напружень за незначного додаткового навантаження осьовим розтягом тонкостінного циліндра під тиском. За навантажень, близьких до осьового розтягу (рис. 6б), впливом k на значення дійсних осьових граничних напружень можна знехтувати.

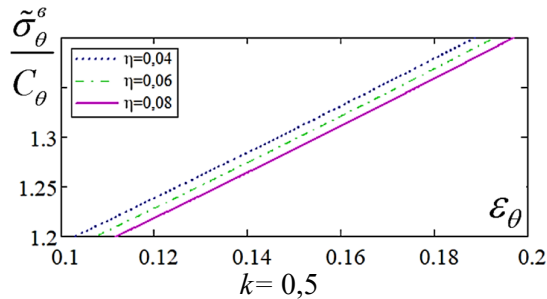


Рис. 7. Графічне зображення залежності (7) за різних η

Вплив показника тонкостінності $\eta = h/R$ на граничні значення дійсних колових напружень показано на рис. 7.

Аналіз граничних кривих (9) для $\sigma_z > \sigma_\theta$ та значень $\eta = 0,04; 0,06; 0,08$ показав, що розрахунковий ресурс міцності труби в цьому випадку майже не залежить від відношення h/R .

При розгляді навантаження тонкостінної осесиметричної оболонки з коловим радіусом ρ_t та меридіональним радіусом ρ_m внутрішнім тиском q та розтягом N (рис. 8) вважали, що утворені

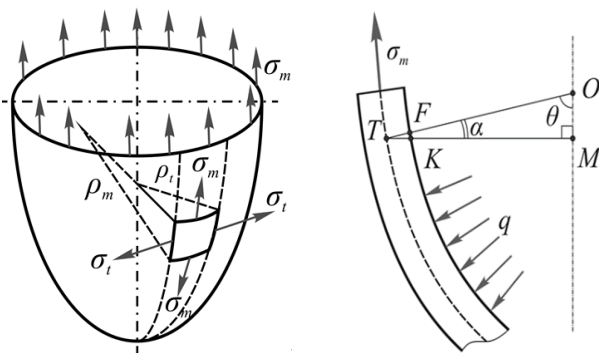


Рис. 8. Розрахункова схема тонкостінної осесиметричної оболонки за навантаження внутрішнім тиском та розтягом

меридіональні напруження напрямлені по дотичній до меридіана в кожній точці прикладання. Уведено позначення для показника опуклості оболонки $\nu = \rho_t / \rho_m$.

З умови максимуму внутрішнього тиску $dq = 0$ отримано дійсні колові напруження в момент втрати стійкості ППД (10) та дотичний модуль (11) до кривої деформування в дійсних колових напруженнях $\tilde{\sigma}_t(\varepsilon_t)$:

$$\tilde{\sigma}_t = C_t \frac{\left[(1 + \varepsilon_t)^2 - \eta / 2 \right]^{\frac{4 - (1 - k + 2k^2)\eta v^2}{4 - 2(1 + k^2)\eta v^2}} \left[\frac{1 + \varepsilon_t - \sqrt{\eta/2}}{1 + \varepsilon_t + \sqrt{\eta/2}} \right]^{\frac{v\sqrt{\eta/2}}{2 - (1 + k^2)\eta v^2}}}{\left[1 + \varepsilon_t - \eta v / 2 \right]^{\frac{(1 + k)\eta v^2}{2 - (1 - k)\eta v^2}} [1 + kv(1 + \varepsilon_t)]}, \quad (10)$$

$$\frac{d\tilde{\sigma}_t}{d\varepsilon_t} = \left[\frac{3(1 + \varepsilon_t)^2 - \eta v(1 + \varepsilon_t) - \frac{\eta}{2}}{\left((1 + \varepsilon_t)^2 - \frac{\eta}{2} \right) \left(1 + \varepsilon_t - \frac{\eta v}{2} \right)} - \frac{1 + 2kv(1 + \varepsilon_t)}{(1 + \varepsilon_t)(kv(1 + \varepsilon_t) + 1)} \right] \tilde{\sigma}_t. \quad (11)$$

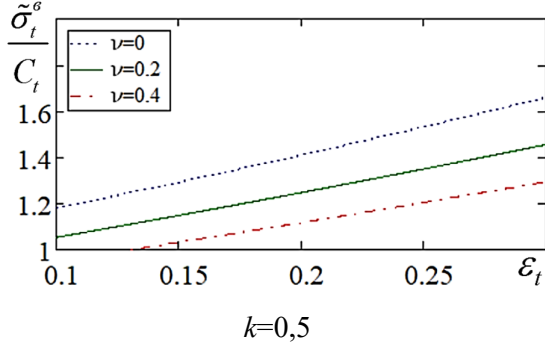


Рис. 9. Графічне зображення залежності (10) за різних v

Графіки залежності $\tilde{\sigma}_t(\varepsilon_t)$ (10) свідчать, що за внутрішнього тиску ($k=0,5$) збільшення показника опуклості v призводить до зменшення рівня розрахункових граничних дійсних колових напружень. Так, збільшення v від 0 (тонкостінний циліндр) до 0,2 та від 0,2 до 0,4 зменшує рівень приведених розрахункових граничних колових напружень на 12–13% (рис. 9).

З умови $dN=0$ отримано граничні дійсні меридіональні напруження $\tilde{\sigma}_m$ (12) із позначенням $a = (1 - \eta / (1 - \cos 2\theta))^2$ та дотичний модуль (13):

$$\tilde{\sigma}_m = C_m \frac{(1 + \varepsilon_m) \left[1 - \frac{\eta v}{2} + \varepsilon_m \left(1 - \frac{\eta v}{2n} \right) \right]}{k \left(1 - \frac{\eta}{2} \right) (2 - \eta v) - a(1 + kv) + \varepsilon_m \left[k \left(1 - \frac{\eta}{2} \right) \left(2 - \frac{\eta v}{n} \right) - a \left(1 + \frac{kv}{n} \right) \right]} \quad (12)$$

$$\frac{d\tilde{\sigma}_m}{d\varepsilon_m} = \left\{ \frac{1}{1 + \varepsilon_m} + \frac{va \left(k + \frac{\eta}{2} \right) \left(\frac{1}{n} - 1 \right)}{\left(1 + \varepsilon_m - \frac{\eta v}{2} \left(1 + \frac{\varepsilon_m}{n} \right) \right) \left[2k \left(1 - \frac{\eta}{2} \right) \left(1 + \varepsilon_m - \frac{\eta v}{2} \left(1 + \frac{\varepsilon_m}{n} \right) \right) - a \left(1 + \varepsilon_m + kv \left(1 + \frac{\varepsilon_m}{n} \right) \right) \right]} \right\} \tilde{\sigma}_m \quad (13)$$

Графічний аналіз залежності (12) для трьох значень показника опуклості v довів, що розрахункові граничні напруження $\tilde{\sigma}_m$ є більшими для оболонки з більшою опуклістю. Так, збільшення v від 0 до 0,2 та від 0,2 до 0,4 збільшує рівень приведених розрахункових граничних меридіональних напружень в середньому на 12–13%. Умови (10)–(13) у частковому випадку ($v=0$) зводяться до умов, отриманих для тонкостінного циліндра.

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 ($k=0,5..2$).

Розглянуто дійсні еквівалентні напруження:

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{p}{2} \left[\frac{|\tilde{\sigma}_z - \tilde{\sigma}_\theta|^p + |\tilde{\sigma}_z|^p + |\tilde{\sigma}_\theta|^p}{2} \right]^{\frac{1}{p}}. \quad (14)$$

Показано, що за простого навантаження ($\sigma_z / \sigma_\theta = k$) сімейство узагальнених кривих деформування в дійсних напруженнях можна подати як систему:

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}_{eq} = \varphi(\sigma_z, \varepsilon_z, k, p), \\ \varepsilon_{eq} = \psi(\varepsilon_z, k, p). \end{cases} \quad (15)$$

Врахувавши залежності (14), (15) та $d\varepsilon_z = n d\varepsilon_\theta$, отримано формулу для знаходження дотичного модуля до дійсної узагальненої кривої деформування:

$$\frac{d\tilde{\sigma}_{eq}}{d\varepsilon_{eq}} = \frac{\frac{\partial \tilde{\sigma}_{eq}}{\partial \tilde{\sigma}_z} \cdot \frac{d\tilde{\sigma}_z}{d\varepsilon_z} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{eq}}{\partial \tilde{\sigma}_\theta} \cdot \frac{d\tilde{\sigma}_\theta}{nd\varepsilon_\theta}}{\frac{d\varepsilon_{eq}}{d\varepsilon_z}}. \quad (16)$$

Врахувавши формулу (14) та використавши позначення $A = (\varepsilon_z)^p \left| 1 - \frac{1}{n} \right|^p + \frac{\left| (1 + \varepsilon_z)^2 (1 + \varepsilon_z / n) - 1 \right|^p + \left| (1 + \varepsilon_z)(1 + \varepsilon_z / n)^2 - 1 \right|^p}{\left((1 + \varepsilon_z) |1 + \varepsilon_z / n| \right)^p}$, $b = \frac{1}{(1 + \varepsilon_z)(1 + \varepsilon_z / n)}$, отримано залежність між граничним значенням $\tilde{\sigma}_{eq}$ та значенням дотичного модуля:

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{p \cdot 2^{\frac{1}{p}}}{2(p+1)} \cdot (A)^{\frac{1}{p-1}} \times \left[\frac{\left(\varepsilon_z \right)^{p-1} \left| 1 - \frac{1}{n} \right|^p + \frac{\left| 1 + \varepsilon_z - b \right|^p}{1 + \varepsilon_z - b} \left(1 + b^2 \left(1 + \frac{1 + 2\varepsilon_z}{n} \right) \right) + \frac{\left| 1 + \frac{\varepsilon_z}{n} - b \right|^p}{1 + \frac{\varepsilon_z}{n} - b} \left(\frac{1}{n} + b^2 \left(1 + \frac{1 + 2\varepsilon_z}{n} \right) \right)}{\frac{\left(1 - \frac{1}{2k} + \frac{h}{2kR} \right) \frac{1}{1 + \varepsilon_z} + \frac{h}{2knR} \frac{1}{1 + \varepsilon_z / n} + \frac{2(1 + \varepsilon_\theta)(1 + n\varepsilon_\theta) + n(1 + \varepsilon_\theta)^2}{1 - \frac{1}{2k} + \frac{h}{4kR}} + \frac{n \left((1 + \varepsilon_\theta)^2 (1 + n\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2R} \right)}{n \left((1 + \varepsilon_\theta)^2 (1 + n\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2R} \right)}} \right] \frac{d\tilde{\sigma}_{eq}}{d\varepsilon_{eq}}. \quad (17)$$

Вираз біля $d\tilde{\sigma}_{eq} / d\varepsilon_{eq}$ у правій частині формули є коригувальним множником, який враховує механічні властивості матеріалу (p), вид напруженого стану (k, n) та початкову геометрію (h, R) тонкостінного циліндра.

На рис. 10 показано графічні залежності коригувального множника від виду напруженого стану для тонкостінних труб із сталі 45. Якісна картина для сталей 10ГН2МФА, 15Х2НМФА, Х16Н6 – аналогічна. Найменші розрахункові значення коригувального множника, а отже, і найменші граничні напруження, спостерігали за навантаження труби внутрішнім тиском, коли стрімке зростання дійсних колових напружень зумовлене одночасним потоншенням стінки та збільшенням діаметра труби. За додаткового навантаження труби осьовим розтягом значення коригувального множника є більшими, що означає збільшення граничних значень дійсних еквівалентних напружень та, відповідно, порогу міцності труби. Це пояснюється тим, що осьовий розтяг труби стримує розвиток колових деформацій від внутрішнього тиску та збільшення її діаметра.

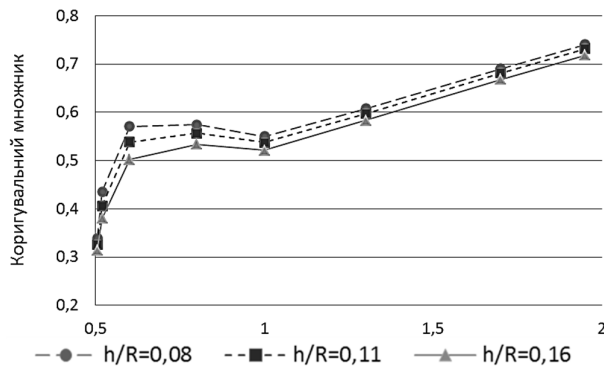


Рис. 10. Залежність коригувального множника у формулі (17) від k за різних значень h/R для сталі 45

Розмах значень коригувального множника для кожної з чотирьох марок сталей становить близько 0,4; усі розрахункові значення для цих матеріалів лежать в інтервалі (0,2; 0,9).

Формула (17) узгоджується з відомими результатами в часткових випадках навантаження труби лише внутрішнім тиском чи осьовим розтягом та дозволяє прогнозувати початок локалізації пластичних деформацій за всіх типів комбінованого навантаження.

Запропоновано алгоритм методу прогнозування границі міцності тонкостінного циліндра із днищами, навантаженого внутрішнім тиском q та осьовим розтягом N , та визначення граничних значень силових факторів, який формується з послідовності задач (рис. 11):

- I) знаходження сталої p за первинними діаграмами деформування, побудованими для кількох значень $k = \sigma_z / \sigma_\theta$ за простого навантаження та побудова узагальненої кривої деформування;
- II) встановлення залежності між дійсними напруженнями та деформаціями в еквівалентних координатах;
- III) визначення граничних значень дійсних напружень в еквівалентних координатах з рівняння (17);
- IV) обчислення граничних значень внутрішнього тиску q та розтягу N .

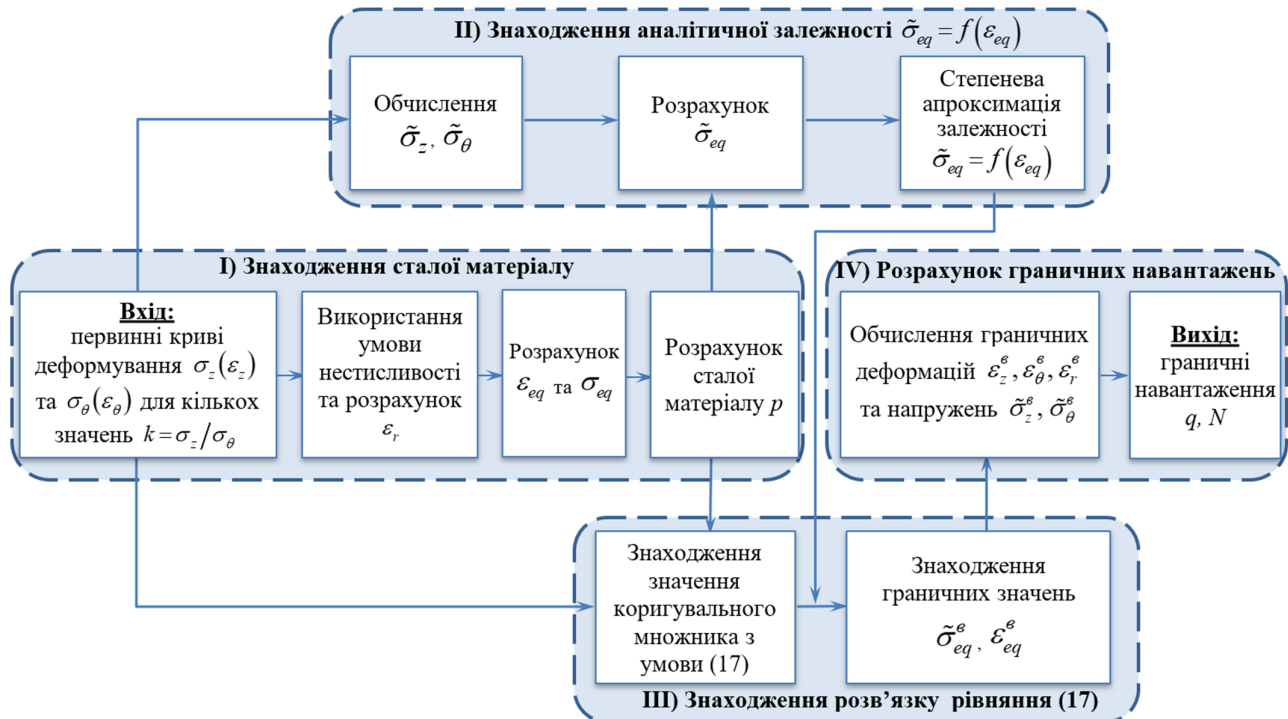


Рис. 11. Алгоритм методу прогнозування границі міцності тонкостінного циліндра, навантаженого внутрішнім тиском q та осьовим розтягом N

У 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.

На першому етапі отримано сталу фізико-механічних властивостей матеріалу p . Для відібраної множини експериментальних точок обчислено коефіцієнт кореляції Пірсона r та усереднене значення коефіцієнта варіації V . Для подальших розрахунків значення сталої p прийнято з умови максимуму коефіцієнта r . За точками $((\varepsilon_{eq})_i, (\sigma_{eq})_i)$, отриманими для $p=1,30$ (сталь 45) та $p=1,59$ (сталь 10ГН2МФА), побудовано узагальнені криві деформування. Рівняння узагальнених деформаційних кривих та коефіцієнти детермінації:

$$\sigma_{eq} = 721,42 \cdot \varepsilon_{eq}^{0,2286}, \quad R^2 = 0,973 \quad (\text{сталь 45}), \quad (18)$$

$$\sigma_{eq} = 672,17 \cdot \varepsilon_{eq}^{0,1047}, \quad R^2 = 0,902 \quad (\text{сталь 10ГН2МФА}). \quad (19)$$

Дійсні узагальнені криві деформування, рівняння степеневі регресії та коефіцієнти детермінації показано на рис. 12.

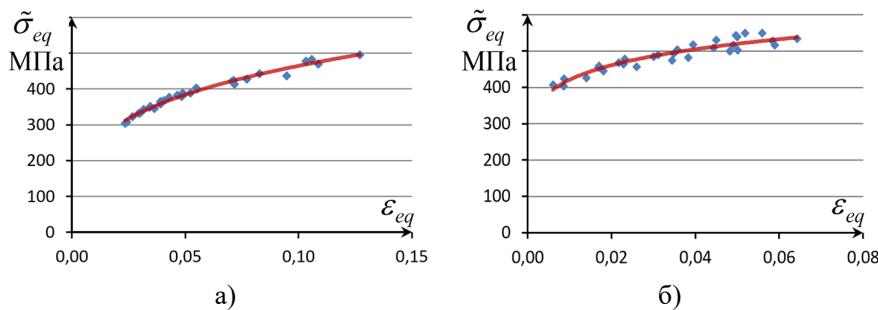


Рис. 12. Експериментальні точки, дійсні узагальнені криві деформування та коефіцієнти детермінації для:

а) сталі 45

$$(\tilde{\sigma}_{eq} = 874,32 \varepsilon_{eq}^{0,275}, R^2 = 0,983);$$

б) сталі 10ГН2МФА

$$(\tilde{\sigma}_{eq} = 771,01 \varepsilon_{eq}^{0,132}, R^2 = 0,896)$$

Граничні значення дійсних напружень в трубі, навантаженій внутрішнім тиском та розтягом, розглянуто для різних співвідношень h/R (табл. 2).

Табл. 2. Початкові розміри труб

№ з/п	Товщина стінки h , мм	Зовнішній діаметр, мм	h/R
1	2,5	65	0,08
2	6	108	0,11
3	6	76	0,16

В системі координат $(\varepsilon_{eq}; \tilde{\sigma}_{eq})$

побудовано графіки обох частин рівняння (17). При $k \gg 2$ напружено-деформований стан труби близький до одновісного розтягу, тому на рисунках відображено результати розрахунків для діапазону, важливого для застосувань, при $k \in$

$(0,5; 2)$. Дотичний модуль виражається формулою $d\tilde{\sigma}_{eq}/d\varepsilon_{eq} = AB\varepsilon_{eq}^{B-1}$. На рис. 13 показано графічне розв'язування рівняння (17) для співвідношення $h/R=0,11$. Якісна картина для $h/R=0,08$ та $h/R=0,16$ є аналогічною.

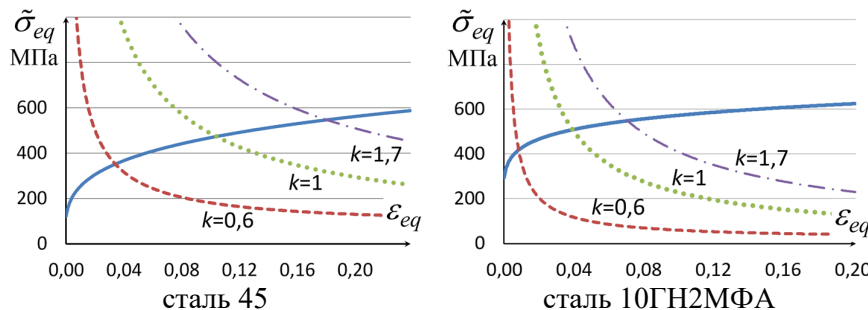


Рис. 13. Графічне розв'язання рівняння (17) для тонкостінних труб ($h/R=0,11$) із сталі 45 та сталі 10ГН2МФА. Суцільна лінія – дійсна узагальнена крива деформування, пунктирні лінії – графіки правої частини рівняння (17)

Аналіз рис. 13 довів, що вид напруженого стану істотно впливає на ресурс міцності труби. Найменших своїх значень $\tilde{\sigma}_{eq}$ та ε_{eq} набувають у випадку, коли навантаження близьке до внутрішнього тиску ($k \rightarrow 0,5$). При одночасній дії внутрішнього тиску та осевого розтягу ($k \rightarrow 2$) граничні дійсні еквівалентні напруження та деформації збільшуються.

На рис. 14 показано залежність граничних значень дійсних колових $\tilde{\sigma}_\theta$ та дійсних осевих $\tilde{\sigma}_z$ напружень від k для різних співвідношень h/R . При навантаженні труби лише внутрішнім тиском розрахункове граничне дійсне осеве напруження збігається з довідниковим, що пояснюється нульовими осевими деформаціями.

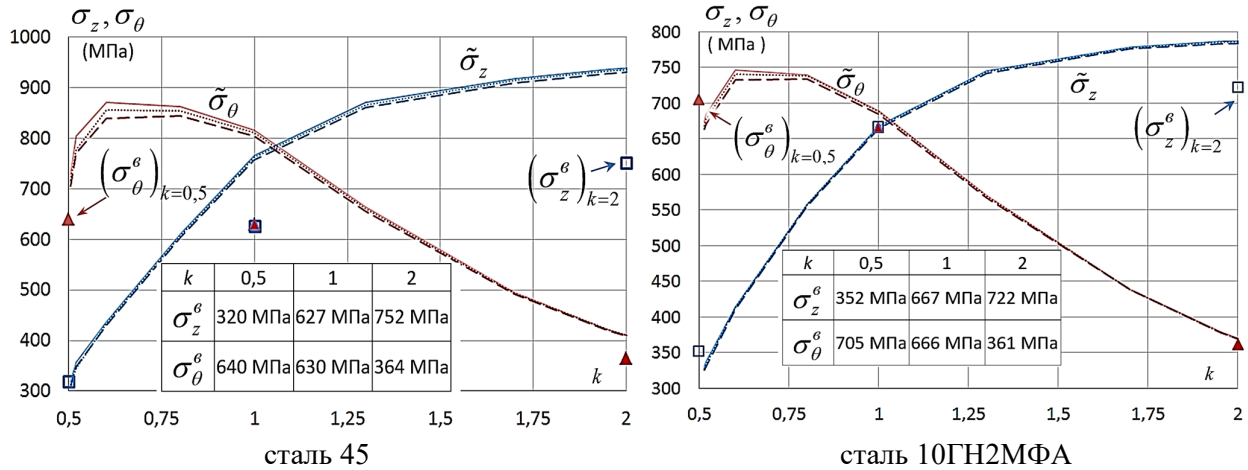


Рис. 14. Залежність граничних значень дійсних напружень від виду напруженого стану k за різних відношень h/R . Позначено: — — $h/R=0,08$; — $h/R=0,11$; - - - $h/R=0,16$.
Окремими точками показано інженерні границі міцності для $k = 0,5; 1; 2$

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. Деяко занижені значення розрахункових дійсних напружень для сталі 10ГН2МФА зумовлені накопиченими похибками, зокрема, на етапі оцифрування первинних кривих деформування, наданих в першоджерелі.

На рис. 15 показано залежності значень граничних силових факторів від виду напруженого стану k для різних h/R . Окремими замальованими позначками показані розрахункові інженерні значення тиску для труби, обчислені за формулою:

$$q_{инж} = \frac{2h\sigma_z^e}{D_3 n}, \text{ де } \sigma_z^e \text{ – границя міцності за одновісного розтягу, } D_3 \text{ – зовнішній}$$

діаметр труби, n – коефіцієнт запасу. Для сталі 45 взято $n=1,85$, для сталі 10ГН2МФА взято $n=1,7$. Порожніми позначками тієї ж форми показано інженерні значення тиску, розраховані без врахування коефіцієнта запасу. Після досягнення відношенням h/R певної межі максимальні значення розтягу N зменшуються, що означає існування оптимального, в розумінні міцності, відношення товщини стінки труби до її діаметра.

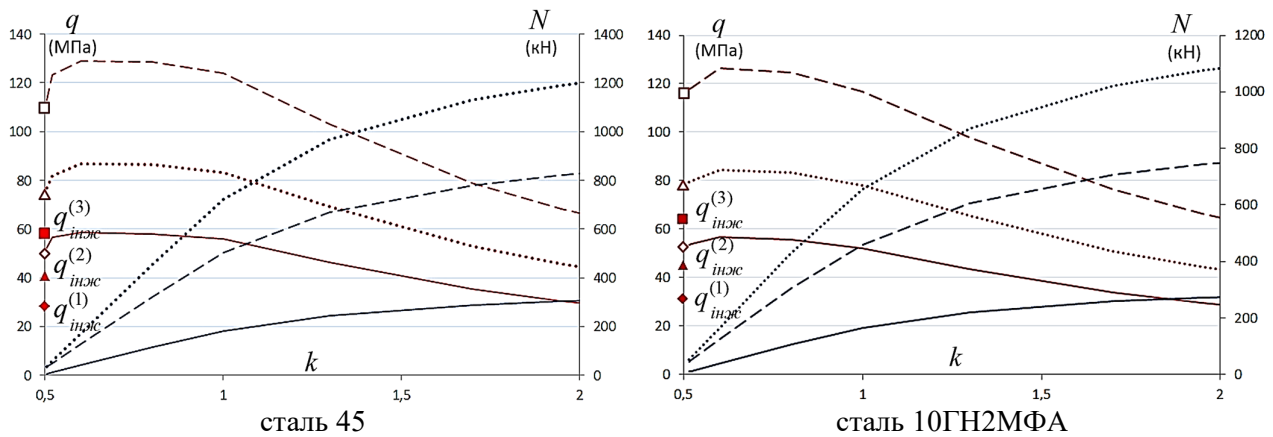


Рис. 15. Залежності граничних значень силових факторів q , N від виду напруженого стану k та відношення h/R . Позначено: — $h/R=0,08$; $h/R=0,11$; - - - $h/R=0,16$.

Окремими позначками показано інженерні границі міцності для $k = 0,5; 1; 2$

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.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу удосконалення аналітико-розрахункового підходу до прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом, що має істотне значення при проєктуванні та експлуатації конструкцій з метою зменшення їх матеріалоемності, підвищення ефективності використання та рівня безпеки.

Основні наукові результати дисертаційного дослідження полягають у наступному:

1. Розроблено систему еквівалентних координат для аналітичного опису узагальненої діаграми деформування, яка узгоджується з класичними підходами, а також враховує результати експериментів.

Запропонована в роботі феноменологічна модель узагальненої кривої деформування інтегрально враховує фізико-механічні властивості матеріалу через введення 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 .

2. Розроблено алгоритм отримання параметра фізико-механічних властивостей матеріалу для знаходження еквівалентних напружень та деформацій.

На основі дослідних даних, запозичених з відкритих джерел для серії вуглецевих сталей, легованих сталей та титанових сплавів встановлено, що існує таке розрахункове значення параметра p , для якого можна побудувати криву деформування з найменшим показником розсіювання точок. Значення параметра p спостерігались в інтервалі (1; 2), відносний показник розсіювання не перевищував 8,5%. Рівняння степеневої регресії для узагальненої кривої деформування за оптимальних значень параметра p отримано з індексом детермінації $R^2 \geq 0,58$.

Створена в ході дослідження комп'ютерна програма дозволяє отримати оптимальне значення параметра p , рівняння регресії для узагальненої кривої деформування та відповідні показники якості за результатами кількох дослідів на двовісний розтяг.

3. Сформульовано умови досягнення дійсної границі міцності для навантажених конструкційних елементів типових геометричних форм за плоского напруженого стану.

Проаналізовано вплив виду напруженого стану та геометричних параметрів конструкційних елементів на граничні значення дійсних напружень в момент появи місцевих деформацій. Принцип максимуму навантаження використано для отримання двох видів залежностей: граничних умов, графіками яких є січні дійсних діаграм деформування, та дотичних модулів. Граничні умови, отримані для навантаження тонкостінних осесиметричних оболонок, застосовні до напружених станів $\sigma_z/\sigma_\theta \approx 0,5; 2$. Дотичні модулі використано при конструюванні узагальненої умови втрати стійкості процесу пластичного деформування тонкостінної труби за комбінованого навантаження внутрішнім тиском та розтягом із $k \in (0,5; 2)$ Аналітично підтверджено факт зменшення ресурсу міцності тонкостінного циліндра за співвідношень головних напружень $k \approx 0,5$.

Показано, що для $k > 1$ ресурс міцності тонкостінного циліндра є інваріантним до відношення h/R . Незначне довантаження осьовим розтягом (при $k \approx 0,6$) збільшує граничні значення дійсних розрахункових колових напружень для циліндра, але зменшує їх для осесиметричної оболонки додатної гаусівської кривизни.

4. Розроблено метод прогнозування граничних станів тонкостінних оболонок за плоского напруженого стану із врахуванням їх геометрії.

Детальний опис методу здійснено для тонкостінної труби, навантаженої внутрішнім тиском та осьовим розтягом. Встановлено основні аналітичні залежності та розроблено алгоритм методу. Побудовано узагальнену дійсну криву деформування $\tilde{\sigma}_{eq}(\varepsilon_{eq})$. Основна формула методу містить коригувальний множник, що враховує фізико-механічні властивості матеріалу, вид напруженого стану та геометрію елемента в комплексі. Розрахункові значення коригувального множника для $k \in (0,5; 2)$, отримані для сталей чотирьох марок (сталь 45, 10ГН2МФА, 15Х2НМФА, Х16Н6), лежать в інтервалі (0,2; 0,9). Розмах значень коригувального множника для кожної з чотирьох марок сталей становить 0,4-0,45.

5. Створено та реалізовано інженерну методику розрахунку граничних навантажень для тонкостінних циліндричних труб, виготовлених з різних типів пластичних конструкційних матеріалів.

Для двох марок сталей (вуглецевої сталі 45 та легованої сталі 10ГН2МФА) аналітично підтверджено збільшення порогу міцності за незначного додаткового навантаження труби під тиском осьовим розтягом ($k=0,6..0,8$). Зі збільшенням показника тонкостінності удвічі (від 0,08 до 0,16) максимальні розрахункові граничні колові напруження (при $k=0,6$) зменшуються на 4–5% для сталі 45 та на 2–3% для сталі 10ГН2МФА, що підтверджує недоцільність покращення міцнісних характеристик елементів конструкцій лише за рахунок збільшення їх масивності. Збільшення показника h/R від 0,08 до 0,11 дозволяє збільшити внутрішній тиск в 1,5 рази та силу розтягу в 3,5..4 рази при $k \approx 2$ для обох матеріалів. Наступне збільшення відношення h/R (від 0,11 до 0,16) збільшує граничний внутрішній тиск в 1,3..1,5 рази, проте зменшує максимально допустимий розтяг в $\approx 1,5$ рази.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шкодзінський О. К., Козбур Г. В., Костишин С. О. Методика узагальнення діаграми деформування ізотропних матеріалів для складного напруженого стану. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2005. № 10 (1). С. 25–30. (**Google Scholar**)
2. Шкодзінський О. К., Козбур Г. Методика дослідження стійкості процесу пластичного деформування ізотропних матеріалів для плоского напруженого стану. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2007. № 12 (4), С. 26–31. (**Google Scholar**)
3. Шкодзінський О., Козбур Г. Дослідження стійкості процесу пластичного деформування тонкостінної трубки в умовах складного напруженого стану. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2009. № 14 (3). С. 24–31. (механіка та матеріалознавство). (**Google Scholar**)
4. Козбур Г. В. Пружно-пластичне деформування вісесиметричної оболонки під впливом внутрішнього тиску і розтягу. *Наукові нотатки*. 2016. № 53. С. 79–83. ISSN: 2415-3966 (**Google Scholar**)
5. Kozbur H. Prediction technique for thin-walled cylindrical tubes boundary state. *Scientific Journal of TNTU*. 2019. № 94 (2). P. 145–155. (**Index Copernicus, Google Scholar**)
6. Козбур Г. В., Шкодзінський О. К. Осесиметричні пластичні деформації тонкостінного циліндра. *Наукові нотатки*. 2019. № 68. С. 41-49. ISSN: 2415-3966 (**Google Scholar**) <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.68.6>
7. Kozbur H., Shkodzinsky O., Kozbur I., Gashchyn N. Prediction of the Boundary States for Thin-Walled Axisymmetric Shells Under Internal Pressure and Tension Loads, *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*. 2019. № 70 (1). P. 57–68. (**SCOPUS**) <https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0006> ISSN: 0039-2472 (print) ISSN: 2450-5471 (online)
8. Kozbur H., Shkodzinsky O., Kozbur I. Construction of a generalized hardening curve for isotropic plastic metal materials. *Scientific Bulletin Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. 2020. № 1 (48), P. 38–46. ISSN: 1993-9965 (print) ISSN 2415-3524 (online) (**Index Copernicus, Google Scholar**) [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-1\(48\)-38-46](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-1(48)-38-46)
9. Kozbur G. V., Shkodzinsky O. K., Gladjo O. Yu. Methods of construction of the generalized hardening curve. *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*. 2020. № 2 (61). P. 78–85. ISSN: 2076-2429 (print) ISSN: 2223-3814 (online) (**Index Copernicus, Google Scholar**) <https://doi.org/10.15276/opu.2.61.2020.09>
10. Kozbur H. Method of predicting necking true stress in a thin-walled tube under a complex stress state. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*. 2020. № 70 (2). P. 101–116. ISSN: 0039-2472 (print) ISSN: 2450-5471 (online) (**SCOPUS**) <https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0024>
11. Halyna Kozbur; Oleh Shkodzinsky; Lesia Dmytrotsa. Numerical prediction of the strength of a thin-walled pipe loaded with internal pressure and axial tension, taking into account its actual dimensions. *Scientific Journal of TNTU*. 2020. № 100 (4). P. 11–19. (**Google Scholar**)

12. Шкодзінський О., Козбур Г., Костишин С. Аналіз властивостей ізотропних металевих матеріалів за умов великих пластичних деформацій при різних видах СНС. *Матеріали VIII наукової конференції ТДТУ ім. І. Пулюя, 11–12 травня 2004 року*. Т.: ТДТУ. 2004. С. 5.
13. Шкодзінський О. К., Козбур Г. В. Вплив виду напруженого стану на міцність сталевих трубчастих зразків тиском. *Матеріали Всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя, 13–14 травня 2009 року*. Т.: ТДТУ, 2009. С. 5.
14. Шкодзінський О. К., Козбур Г. В. Умова втрати стійкості процесу пластичного деформування тонкостінної циліндричної трубки в умовах СНС. *Матеріали міжнародної конференції «Сучасні проблеми механіки» ЛьвівНУ ім. І. Франка, 7–9 грудня 2009 р.* С. 90–91.
15. Шкодзінський О. К., Козбур Г. В. Пластичне деформування тонкостінної циліндричної трубки, навантаженої осьовим розтягуючим зусиллям та внутрішнім тиском. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції ТНТУ, 19–21 травня 2010 р.* С. 113.
16. Козбур Г. В., Шкодзінський О. К. Вплив опуклості тонкостінної осесиметричної оболонки на її міцнісні характеристики. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті), 22–24 травня 2018 р.* Т.: ТНТУ, 2018. С. 56.
17. Козбур Г., Гладь О. Валідація моделі єдиної кривої деформування для легованих сталей. *Матеріали конференцій МЦНД, 10.04.20. Луцьк, 2020.* С. 77–79. <https://doi.org/10.36074/0.04.2020.v1.07>
18. Козбур Г. Знаходження параметра для отримання узагальненої кривої зміцнення для ізотропних пластичних металевих матеріалів. *Актуальні проблеми інженерної механіки : тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф.* Одеса : ОДАБА, 2020. С. 159–162. ISBN 978-617-7900-05-3
19. Козбур Г., Шкодзінський О. Валідація моделі узагальненої кривої деформування для конструкційних сталей. *Математичні проблеми технічної механіки – 2020. Міжнародна Наукова Конференція, Дніпро, Україна.* С. 45–47.
20. Козбур Г. В., Козбур І. Р. Валідація моделі узагальненої кривої зміцнення для вуглецевих сталей. *II Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція «Новітні технології в освіті, науці та виробництві» 16 квітня 2020 року, Покровськ, Україна.* С. 213–215.
21. Авторське право на твір «Комп'ютерна програма «The modeling of stress-state-independent deformation curve». Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України, свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 96585 від 10.03.2020.

АНОТАЦІЯ

Козбур Г. В. Прогнозування граничного стану елементів конструкцій за пластичного деформування двовісним розтягом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Міністерство освіти і науки України, м. Тернопіль, 2021.

Спеціалізована рада Д58.052.01 при Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя МОН України.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню аналітико-розрахункового підходу до прогнозування дійсних напружень та навантажень в момент втрати стійкості процесу пластичного деформування елементів конструкцій. Розроблено систему еквівалентних координат для аналітичного опису узагальненої діаграми деформування, яка узгоджується з класичними підходами, а також з результатами експериментів. На основі принципу максимуму навантаження сформульовано аналітичні умови досягнення дійсної границі міцності для конструкційних елементів типових геометричних форм за найпростіших типів навантажень. Розроблено методіку прогнозування дійсної границі міцності зразків пластичних ізотропних конструкційних матеріалів за складного напруженого стану із врахуванням їх геометрії.

Ключові слова: границя міцності, дійсна границя міцності, граничне напруження, втрата стійкості процесу пластичного деформування, локалізація деформацій, узагальнена крива деформування, еквівалентні напруження.

SUMMARY

Kozbur H. V. Predicting of limiting state of structural elements during plastic deformation by biaxial tension. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences (specialty 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids). – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2021.

Thesis is devoted to the improvement of the analytical-computational approach to the predicting of real stresses and loads at the moment of the uniform plastic stability loss. Accurate prediction of ultimate strength requires taking into account the actual dimensions of the loaded element and constructing a true deformation curve. Calculation of ultimate true stresses at the moment of the uniform plastic stability loss under uniaxial tension, based on Swift-Marchiniak criterion and the analytical relationship $\tilde{\sigma} = d\tilde{\sigma} / d\varepsilon$ between true stresses and tangent modulus in true stresses, known as a Considere scheme. There are also known attempts to use the Consider scheme for predicting the ultimate pressure in thin-walled pipes using the ratio $\tilde{\sigma} = \frac{1}{2} d\tilde{\sigma} / d\varepsilon$ that contains a correction factor of $\frac{1}{2}$ of the tangent modulus. The task that was posed in this work was to develop a methodology for determining the limiting values of true stresses and loads in metal structural elements under complex stress state, which would take into account both the physical properties of the material and changes in the actual dimensions during uniform plastic deformation.

A system of equivalent coordinates is developed for the analytical description of the generalized stress-strain curve, which is consistent with classical approaches, as well as with the results of experiments. The proposed phenomenological model of the generalized stress-strain curve integrates the physical and mechanical properties of the material by introducing the parameter p . In particular cases, equivalent stresses and strains are reduced to classical ones: for $p=1$, formulas are obtained for determining the greatest shear stresses and angular deformations τ_{\max} , γ_{\max} , and for $p=2$, the intensity of stresses and strains σ_i , ε_i . Based on experimental data for a series of carbon steels, alloy steels and titanium alloys, it has been established that there is such a calculated value of the parameter p , for which it is possible to construct a deformation curve with the smallest scattering of points. On the basis of the maximum load principle, analytical conditions are formulated for achieving the true ultimate strength for structural elements of typical geometric shapes (strip, plate, thin-walled cylinder and thin-walled axisymmetric shell) for the simplest types of loads. The principle of maximum load is used to obtain two types of dependencies: boundary conditions, the graphs of which are secants of true deformation diagrams, and tangent moduli. Boundary conditions obtained for thin-walled axisymmetric shells, are applicable to stress states close to internal pressure or axial tension. The tangent modules are used to construct a generalized condition for the loss of stability of the plastic deformation process of a thin-walled pipe with a combined load of internal pressure and tension. The influence of the type of stress state and geometric parameters of structural elements on the limiting values of true stresses at the moment of formation of local strains is analyzed. It has been analytically confirmed that the strength life of a thin-walled cylinder is the smallest for loading only by internal pressure. A slight additional load of the cylinder by axial tension increases the limit values of the actual design circular stresses for the pipe, but decreases them for an axisymmetric shell of positive Gaussian curvature.

Method for predicting the true ultimate strength of plastic isotropic structural materials under complex stress state, taking into account their geometry, is developed. A detailed description of the technique is made for a thin-walled pipe loaded with internal pressure and axial tension. The basic formula for finding the actual stresses at the beginning of the localization of deformations is derived and the algorithm of the method is developed. The basic formula of the algorithm contains a correcting factor for the tangent module, which takes into account the physical and mechanical properties of the material, the type of stress state and the geometry of the element in the complex. To implement the technique, a generalized true stress-strain curve was constructed. The calculated values of the correction factor for the case of the combined load of a thin-walled cylinder by internal pressure and axial tension, obtained for steels of four grades (steel 45, 10MnH2MoV, 15Cr2HMoV, Cr16H6), lie in the range (0,2; 0,9). The range of values of the correction factor for each of the four steel grades was 0,4–0,45.

The developed technique is tested for thin-walled cylindrical pipes made of various types of plastic structural materials. For two grades of steels (carbon steel 45 and alloy steel 10MnH2MoV), an increase in the calculated strength threshold is shown with an insignificant additional tension of a pipe under pressure ($\sigma_z/\sigma_\theta = 0,6..0,8$). With increasing the ratio of wall thickness to diameter twice (from 0,08 to 0,16), the maximum calculated limit hoop stresses (at $\sigma_z/\sigma_\theta = 0,6$) decrease by 2–5%, which confirms the inexpediency of

improving the strength of structural elements only by increasing their massiveness. Increasing the ratio h/R from 0.08 to 0.11 makes it possible to increase the internal pressure by 1.5 times and tensile strength by 3,5..4 times when $\sigma_z/\sigma_\theta \approx 2$ for both materials. The next increase in the h/R ratio (from 0,11 to 0,16) increases the allowable internal pressure by 1,3..1,5 times, but reduces the maximum allowable tension by $\approx 1,5$ times. Analysis of the results showed that it is possible to establish a balance between the actual geometry of the element and the load, which will solve the problem of finding the optimal ratio of "weight-strength", important for practical applications in aircraft, rocket and mechanical engineering.

The proposed method for finding the limiting values of actual stresses makes it possible to predict the strength of thin-walled pressure vessels (pipelines, collectors of steam generators, reservoirs, etc., in mechanical engineering, aircraft construction, chemical, food, energy and other industries); choose a realistic safety factor and make optimal engineering solutions at the design and operation stages of structural elements; to increase the efficiency and safety of using pipeline and shell-type saving systems. It is promising to use the method for assessing the behavior of the material at the crack tip to predict its growth.

Key words: ultimate strength, actual ultimate strength, ultimate stress, the uniform plastic stability loss, localization of strains, generalized stress-strain curve, equivalent stresses.

АННОТАЦИЯ

Козбур Г. В. Прогнозирование предельного состояния элементов конструкций по пластического деформирования двухосным растяжением. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Министерство образования и науки Украины., г. Тернополь, 2021.

Диссертационная работа посвящена совершенствованию аналитико-расчетного подхода к прогнозированию действительных напряжений и нагрузок в момент потери устойчивости процесса пластического деформирования элементов конструкций. Разработана система эквивалентных координат для аналитического описания обобщенной диаграммы деформирования, которая согласуется с классическими подходами, а также с результатами экспериментов. На основании принципа максимума нагрузки сформулировано аналитические условия достижения действительного предела прочности для конструктивных элементов типичных геометрических форм при простейших типах нагрузок. Разработана методика прогнозирования действительного предела прочности образцов пластических изотропных конструктивных материалов при СНС с учетом их геометрии.

Ключевые слова: предел прочности, действительный предел прочности, предельное напряжение, потеря устойчивости процесса пластического деформирования, локализация деформаций, обобщенная кривая деформирования, эквивалентные напряжения.