



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ EN 1999-1-5:202__
(EN 1999-1-5:2023, IDT)

**ЄВРОКОД 9.
ПРОЄКТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОНСТРУКЦІЙ.**

Частина 1-5. Конструкції оболонок

(Проект, остаточна редакція)

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
202_

ЗМІСТ

С.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП.....	VI
ПЕРЕДМОВА до EN 1999-1-5:2023.....	VII
0. ВСТУП.....	IX
1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ.....	1
1.1 Сфера застосування EN 1999-1-5	1
1.2 Припущення	3
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ.....	4
3 ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ПОЗНАКИ	4
3.1 Терміни та визначення понять	4
3.1.1 <i>Основні вимоги</i>	5
3.1.2 <i>Окремі визначення щодо розрахунку на втрату стійкості</i>	7
3.2 Позначки.....	8
3.3 Правило знаків	13
3.4 Системи координат	14
4 ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ.....	15
4.1 Загальні положення	15
4.2 Клас слідства і клас виконання	16
5 МАТЕРІАЛИ ТА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	16
5.1 Властивості матеріалу.....	16
5.2 Розрахункові значення геометричних характеристик.....	16
5.3 Геометричні допуски та геометричні недосконалості.....	17
6 ДОВГОВІЧНІСТЬ.....	17
7 КОНСТРУКЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК	18
7.1 Геометричні характеристики	18
7.2 Граничні умови.....	19
7.3 Дії та впливи навколишнього середовища	20
7.4 Результируючі напружень та напруження.....	21
7.5 Види розрахунку.....	21
8 ГРАНИЧНИЙ СТАН ЗА НЕСНОЮ ЗДАТНІСТЮ.....	24
8.1 Опір поперечного перерізу	24
8.1.1 <i>Розрахункові значення напружень</i>	24
8.1.2 <i>Розрахункове значення опору</i>	25
8.1.3 <i>Обмеження за напруженням</i>	25

8.1.4 <i>Проектування за допомогою числового аналізу</i>	25
8.2 Опір втраті стійкості	27
8.2.1 <i>Загальні положення</i>	27
8.2.2 <i>Геометричні допуски, що відповідають втраті стійкості</i>	28
8.2.3 <i>Оболонка під дією стиску і зсуву</i>	28
8.2.4 <i>Ефекти зварювання</i>	33
8.2.5 <i>Проектування за допомогою числового аналізу</i>	38
9 ГРАНИЧНІ СТАНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ	38
9.1 <i>Загальні положення</i>	38
9.2 <i>Прогини</i>	38
ДОДАТОК А (обов'язковий) ФОРМУЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ОБОЛОНКИ НА ВТРАТУ	
СТІЙКОСТІ	39
A.1 <i>Застосування цього додатка</i>	39
A.2 <i>Сфера та область застосування</i>	39
A.3 <i>Непідкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки</i>	39
A.3.1 <i>Позначки та граничні умови</i>	39
A.3.2 <i>Меридіональний (осьовий) стиск</i>	40
A.3.3 <i>Кільцевий стиск (обруч)</i>	43
A.3.4 <i>Зсув</i>	46
A.3.5 <i>Меридіональний (осьовий) стиск з одночасним внутрішнім тиском</i>	48
A.3.6 <i>Комбінації меридіонального (осьового) стиску, кільцевого стиску (обруч) та зсуву</i>	49
A.4 <i>Непідкріплені циліндричні оболонки зі ступінчастою товщиною стінки</i>	51
A.4.1 <i>Загальні положення</i>	51
A.4.2 <i>Меридіональний (осьовий) стиск</i>	53
A.4.3 <i>Кільцевий стиск (обруч)</i>	53
A.4.4 <i>Зсув</i>	58
A.5 <i>Непідсилені циліндричні оболонки, з'єднані внапусток</i>	58
A.5.1 <i>Геометрія та результуючі напруження</i>	58
A.5.2 <i>Меридіональний (осьовий) стиск</i>	59
A.5.3 <i>Кільцевий стиск (обруч)</i>	59
A.5.4 <i>Зсув</i>	60
A.6 <i>Непідкріплені конічні оболонки</i>	60
A.6.1 <i>Загальні положення</i>	60
A.6.2 <i>Розрахункові напруження при втраті стійкості</i>	61

A.6.3 <i>Перевірка міцності при втраті стійкості</i>	62
A.7 Підкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки	64
A.7.1 <i>Загальні положення</i>	64
A.7.2 <i>Ізотропні стінки з меридіональними елементами жорсткості</i>	64
A.7.3 <i>Ізотропні стінки з кільцевими елементами жорсткості</i>	67
A.7.4 <i>Гофровані у кільцевому напрямку стінки з меридіональними елементами жорсткості</i>	67
A.7.5 <i>Гофровані в осьовому напрямку стінки з кільцевими ребрами жорсткості</i>	73
A.7.6 <i>Підкріплена стінка, розглянута як ортотропна оболонка</i>	75
A.7.7 <i>Еквівалентні ортотропні властивості гофрованих листів</i>	79
A.8 Непідкріплені сферичні оболонки під дією рівномірного кільцевого стиску	82
A.8.1 <i>Познаки та граничні умови</i>	82
A.8.2 <i>Критичне напруження при втраті стійкості</i>	82
$\sigma_{\theta, cr} = \sigma_{\varphi, cr} = 0,605 E t r$ (A. 66) A.8.3 <i>Параметр кільцевої втрати стійкості</i>	83
ДОДАТОК В (довідковий) ФОРМУЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НА СТІЙКІСТЬ ТОРО-КОНІЧНИХ І ТОРО-СФЕРИЧНИХ ОБОЛОНОК	85
V.1 Застосування цього додатка	85
V.2 Сфера та область застосування	85
V.3 Познаки та граничні умови	85
V.4 Зовнішній тиск	87
V.4.1 <i>Критичний зовнішній тиск</i>	87
V.4.2 <i>Рівномірний зовнішній тиск від граничного зминання</i>	87
V.4.3 <i>Параметр втрати стійкості під дією зовнішнього тиску</i>	89
V.5 Внутрішній тиск	89
V.5.1 <i>Критичний внутрішній тиск</i>	89
V.5.2 <i>Рівномірний внутрішній тиск від граничного зминання</i>	90
V.5.3 <i>Параметр втрати стійкості під дією внутрішнього тиску</i>	91
БІБЛІОГРАФІЯ	93
ДОДАТОК НА (довідковий) ПЕРЕЛІК НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ УКРАЇНИ, ІДЕНТИЧНИХ ЄВРОПЕЙСЬКИМ ТА МІЖНАРОДНИМ НОРМАТИВНИМ ДОКУМЕНТАМ, ПОСИЛАННЯ НА ЯКІ Є В ЦЬОМУ СТАНДАРТІ	95

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ EN 1999-1-5:202__ (EN 1999-1-5:2023, IDT) «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонок», прийнятий методом перекладу, — ідентичний щодо EN 1999-1-5:2023 (версія en) «Eurocode 9 — Design of aluminium structures — Part 1—1:Shell Structures».

Технічний комітет стандартизації, відповідальний за цей стандарт в Україні, — ТК 301 «Металобудівництво».

Цей стандарт прийнято на заміну ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5 «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонок (EN 1999-1-5:2007, IDT)».

У цьому національному стандарті зазначено вимоги, які відповідають законодавству України.

До стандарта внесено такі редакційні зміни:

— слова «цей європейський стандарт», «цей документ» замінено на «цей стандарт»;

— структурні елементи стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Зміст», «Національний вступ», першу сторінку, «Терміни та визначення понять» і «Бібліографічні дані» — оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;

— у розділі «Нормативні посилання», у «Додатку А» та в «Бібліографії» наведено «Національне пояснення», виділене рамкою;

— долучено довідковий додаток НА (Перелік національних стандартів України, ідентичних європейським та міжнародним нормативним документам, посилання на які є в цьому стандарті).

Копії нормативних документів, на які є посилання в цьому стандарті, можна отримати в Національному фонді нормативних документів.

ПЕРЕДМОВА до EN 1999-1-5:2023

Цей стандарт (EN 1999-1-5:2023) підготував Технічний комітет CEN/TC 250 «Будівельні Єврокоди», секретаріат якого діє за підтримки BSI. CEN/TC 250 призначений CEN відповідальним за будівельні та геотехнічні питання проектування та несе відповідальність за всі будівельні Єврокоди.

Цьому стандарту буде надано статус національного з публікуванням ідентичного тексту або схваленням не пізніше ніж у вересні 2027 року, при цьому національні стандарти, положення яких суперечать цьому стандарту, мають бути скасовані не пізніше ніж у березні 2028 року.

Потрібно звернути увагу на те, що деякі елементи цього стандарту можуть бути предметом патентних прав. CEN не несе відповідальності за виявлення таких патентних прав частково або повною мірою.

Цей документ замінює EN 1999-1-5:2007.

Порівняно з попередньою редакцією у цей стандарт внесено такі основні зміни:

- упорядковано текст та приведено його у відповідність з EN 1999-1-1 та іншими Єврокодами;
- оновлено додаток A, у частині формул втрати стійкості для циліндрів, конусів і сфер;
- оновлено та уточнено формулювання для коефіцієнтів пониження, обумовлених недосконалостями, наведеними у додатку A, що належать до непідкріплених і підкріплених оболонок, схильних до осьового навантаження, кільцевого тиску та зсуву, включно з випадком осьового стиску при одночасному внутрішньому тиску;
- точніше узгоджено криві втрати стійкості з наявними порівняльними даними, також з урахуванням додавання нового класу матеріалу в стандарт EN 1999, що призвело до появи трьох класів втрати стійкості A, B і C;
- поліпшено формулювання.

Перше покоління Єврокодів як європейських стандартів EN, було

опубліковано у 2002 — 2007 роках. Цей стандарт є частиною другого покоління Єврокодів, які було розроблено згідно з мандатом M/515, наданим CEN Комісією європейської спільноти та Європейською асоціацією вільної торгівлі.

Єврокоди було розроблено для використання в поєднанні з відповідними стандартами на виконання робіт, матеріали, вироби та випробування, а також для визначення вимог до виконання робіт, матеріалів, виробів та випробувань, на яких базуються Єврокоди.

Єврокоди визнають відповідальність держав-членів та гарантують їх право визначати величини, пов'язані з регулюванням питань національної безпеки, через застосування національних додатків.

Будь-які відгуки та запитання щодо цього стандарту потрібно надсилати до національного органу стандартизації. Повний перелік цих органів можна знайти на веб-сайті CEN.

Відповідно до внутрішніх постанов CEN/CENELEC цей європейський стандарт зобов'язані прийняти національні органи стандартизації таких країн: Австрії, Бельгії, Болгарії, Хорватії, Кіпру, Чеської Республіки, Данії, Естонії, Фінляндії, Франції, Німеччини, Греції, Угорщини, Ісландії, Ірландії, Італії, Латвії, Литви, Люксембургу, Мальти, Нідерландів, Норвегії, Польщі, Португалії, республіки Північна Македонія, Румунії, Сербії, Словаччини, Словенії, Іспанії, Швеції, Швейцарії, Туреччини та Великої Британії.

0. ВСТУП

0.1 Вступ до Єврокодів

Будівельні Єврокоди містять наступні стандарти, як правило, складені з декількох частин:

- EN 1990. Єврокод. Основи проектування конструкцій;
- EN 1991. Єврокод 1. Дії на конструкції.
- EN 1992. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій.
- EN 1993. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій;
- EN 1994. Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій;
- EN 1995 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій;
- EN 1996 Єврокод 6. Проектування кам'яних конструкцій;
- EN 1997 Єврокод 7. Геотехнічне проектування;
- EN 1998 Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій;
- EN 1999 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій;
- На стадії розроблення перебувають нові частини, наприклад Єврокод з проектування скляних конструкцій.

Єврокоди призначені для застосування проєктувальниками, замовниками, виробниками, конструкторами, відповідними органами (під час виконання обов'язків відповідно до національних або міжнародних правил), педагогами, розробниками програмного забезпечення та комітетами, що розробляють стандарти для відповідних виробів, та стандарти на випробування і на виконання.

Примітка. Певні аспекти проєктування найбільш відповідним чином визначені відповідними органами або, якщо не вказано, можуть бути узгоджені на проєктній основі між відповідними сторонами, наприклад проєктувальником та замовником. Єврокоди встановлюють такі аспекти з чітким посиланням на відповідні органи влади та відповідні сторони.

0.2 Вступ до EN 1999 (усі частини)

EN 1999 (всі частини) регламентує питання проектування будівель і споруд цивільного призначення та конструкційних виробів із алюмінію. Він реалізує принципи і вимоги до безпеки та експлуатаційної придатності конструкцій, основи їх проектування і перевірки, наведені в стандарті EN 1990 «Основи будівельного проектування».

EN 1999 (усі частини) стосується лише вимог до механічної стійкості, експлуатаційної придатності, довговічності та вогнестійкості алюмінієвих конструкцій. Інші вимоги, наприклад ті, що стосуються тепло- або звукоізоляції, не розглядаються.

EN 1999 (всі частини) не містить особливих вимог щодо сейсмічного проектування. Положення, що стосуються таких вимог, наведено в EN 1998, що доповнює EN 1999 і узгоджений з ним.

Єврокод 9 складений з таких частин:

- EN 1999-1-1 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила;
- EN 1999-1-2 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість;
- EN 1999-1-3 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-3. Конструкції схильні до втоми;
- EN 1999-1-4 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-4. Холодноформовані листи;
- EN 1999-1-5 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонок.

0.3 Вступ до EN 1999-1-5

Цей стандарт поширюється на конструктивний розрахунок підкріплених та непідкріплених алюмінієвих конструкцій, що мають форму оболонки обертання або круглої панелі в конструкціях, в яких оболонка є єдиним несним елементом.

0.4 Застосовні у Єврокодах уніфіковані мовні форми

Словом «потрібно» позначено жорстку вимогу, від якої не допускається жодних відхилень з метою дотримання Єврокодів.

Словами «рекомендовано», «має» позначено настійно рекомендований вибір або спосіб дії. Застосування альтернативних підходів дозволено за умови технічного обґрунтування відповідно до національного законодавства та/або будь-яких відповідних договірних положень.

Словами «дозволено», «можна» позначено спосіб дії, допустимий в рамках Єврокодів.

Словами «має можливість» позначено можливість та здатність; його використовують для констатації факту і роз'яснення концепцій.

0.5 Національний додаток до EN 1999-1-5

У цьому стандарті дозволено національний вибір у місцях, де це явно зазначено в примітках. Національний вибір включає вибір значень для параметрів, визначених на національному рівні (*Nationally determined parameters; NDP*).

Національний стандарт, що впроваджує EN 1999-1-5, може містити національний додаток з усіма параметрами, визначеними на національному рівні, необхідними для проєктування будівель і споруд цивільного призначення з метою будівництва у відповідній країні.

Якщо національний вибір не наведено, потрібно застосовувати наведений у цьому стандарті вибір за замовчуванням.

Якщо національний вибір не виконано, а вибір за замовчуванням у цьому стандарті відсутній, параметри можуть бути уточнені відповідальним органом, чи, якщо не вказано інше, узгоджені для конкретного проєкту відповідальними сторонами.

У EN 1999-1-5 національний вибір дозволено у таких пунктах:

прДСТУ EN 1999-1-5:202X

— пункти відсутні.

У EN 1999-1-5 національний вибір дозволено під час застосування наступних довідкових додатків:

Додаток В

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ЄВРОКОД 9.

ПРОЄКТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОНСТРУКЦІЙ. ЧАСТИНА 1-5. КОНСТРУКЦІЇ ОБОЛОНОК

EUROCODE 9 — DESIGN OF ALUMINIUM STRUCTURES — PART 1—5: SHELL STRUCTURES

Чинний від 202X-XX-XX

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Сфера застосування EN 1999-1-5

(1) Цей стандарт поширюється на конструктивний розрахунок підкріплених та непідкріплених алюмінієвих конструкцій, що мають форму оболонки обертання або круглої панелі в конструкціях, в яких оболонка є єдиним несним елементом.

(2) Цей стандарт містить додаткові положення до наведених у відповідних частинах стандарту EN 1999 для проєктування алюмінієвих конструкцій.

Примітка. Додаткову інформацію щодо окремих типів оболонок наведено у EN 1993-1-6 і відповідних частинах EN 1993, а саме:

- Частина 3-1 для башт та щогол;
- Частина 3-2 для димарів;
- Частина 4-1 для силосів;
- Частина 4-2 для бункерів;
- Частина 4-3 для трубопроводів.

(4) Вимоги цього стандарту стосуються осесиметричних оболонок (циліндрів, конусів, сфер), та пов'язаних з ними кільцевих і круглих пластин, а також кільцевих перерізів балок і стрингерів, у випадку коли вони є частиною цілої конструкції.

(5) Цей стандарт не охоплює повністю окремі панелі оболонок (циліндричні, конічні або сферичні). Однак, до них також можливо застосувати вищезазначені положення за умови належного врахування правильних граничних умов.

(6) Типи стінок оболонок, охопленні цим стандартом (див. рисунок 1.1):

- стінка оболонки з листового прокату, у якій прилеглі пластини з'єднано стиковими зварними швами, далі “ізотропна”,
- стінка оболонки, утворена з'єднанням внапусток окремих пластин, далі “зі стиками внапусток”
- стінка оболонки із прикріпленими ззовні елементами жорсткості, далі “із зовнішніми елементами жорсткості”, незалежно від кроку елементів жорсткості;
- стінка оболонки, гофрована в меридіональному напрямку, далі “з осьовим гофруванням”
- стінка оболонки з гофрованих листів, розташованих гофрами у кільцевому напрямку, далі «з кільцевим гофруванням».

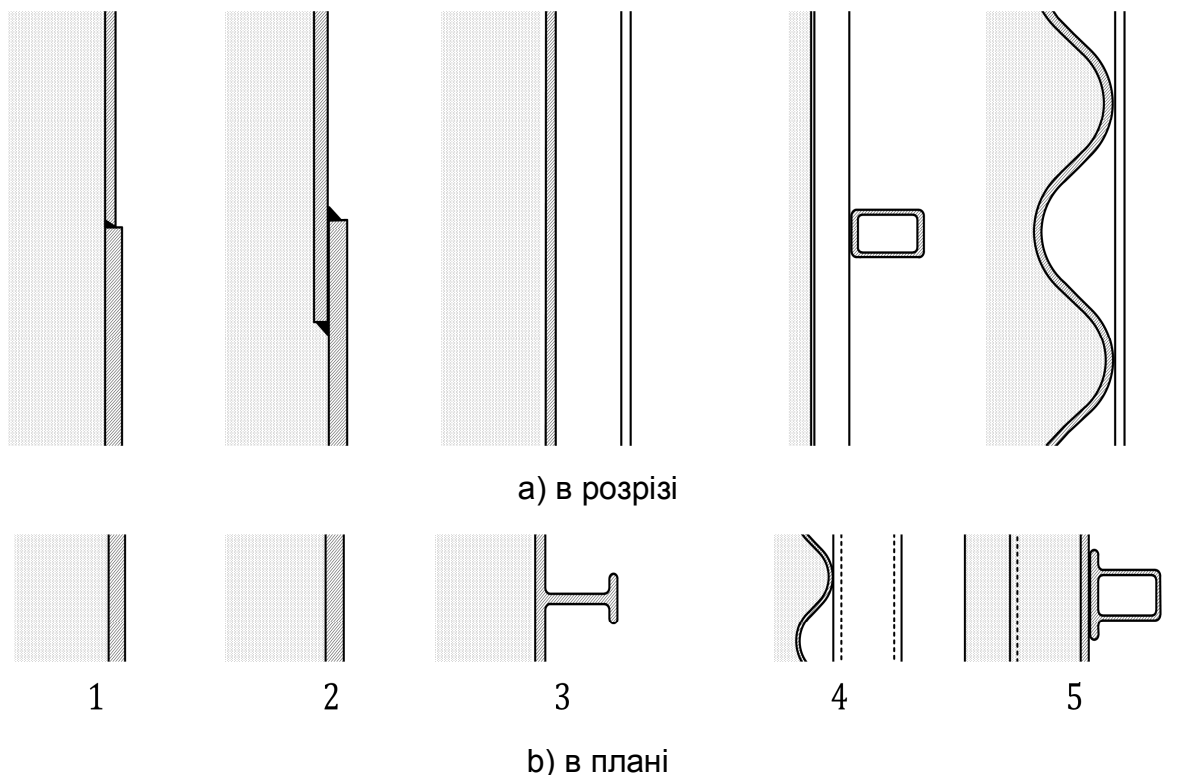


Рисунок 1.1 — Зображення циліндричних оболонок

Умовні позначки:

- 1 — ізотропні (непідкріплені);
- 2 — зі стиками внапусток;
- 3 — із зовнішніми елементами жорсткості;
- 4 — з осьовим гофруванням;
- 5 — з кільцевим гофруванням.

Рисунок 1.1 — аркуш 2

(7) Положення EN 1999-1-5 призначені для застосування в межах температурного діапазону, визначеного в EN 1999-1-1. Максимальна температура обмежена, тому впливом повзучості можна знехтувати. Вимоги до конструкцій під впливом підвищених температурах, пов'язаних з вогнем наведено у. EN 1999-1-2.

(8) EN 1999-1-5 не охоплює питань герметичності оболонок.

1.2 Припущення

(1) Застосовні загальні положення стандарту EN 1990.

(2) Застосовні положення EN 1999-1-1.

(3) Процедури проєктування дійсні тільки при дотриманні вимог до виконання, викладених в стандарті EN 1090-3, або інших еквівалентних вимог.

(4) Проєктування нових конструкцій за EN 1999 передбачає одночасне застосування EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993, EN 1994, EN 1995, EN 1997 та EN 1998.

(5) EN 1999 призначений для використання разом з:

— Європейськими стандартами на будівельні вироби, застосовними до алюмінієвих конструкцій;

— EN 1090-1 Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 1. Вимоги до оцінки відповідності елементів конструкцій;

— EN 1090-3 Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 3 Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Посилання на зазначені нижче документи наведено в тексті так, що частина або весь їхній зміст обґрунтовують викладені в цьому стандарті вимоги. У разі датованих посилань застосовують тільки наведені видання. У разі недатованих посилань потрібно користуватись останнім виданням нормативних документів (разом зі змінами).

Примітка. Перелік інших цитованих документів, які не включено до нормативних посилань, в тому числі тих, на які посилаються як на рекомендації (тобто через пункти «рекомендовано») та дозволи (тобто через пункти «дозволено», «може») наведено у Бібліографії.

EN 1990 Eurocode — Basis of structural design;

EN 1999-1-1:2023 Eurocode 9 — Design of aluminium structures — Part 1-1: General rules.

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 1990 Єврокод. Основи проектування конструкцій;

EN 1999-1-1:2003 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій.

Частина 1-1 Загальні правила

3 ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ПОЗНАКИ

3.1 Терміни та визначення понять

У цьому стандарті вжито терміни та визначення понять, зазначені в EN 1990, а також наведені нижче.

ISO та IEC підтримують термінологічні бази даних для використання в стандартизації за такими адресами:

— ISO онлайнова інтернет-платформа, доступна за адресою: <http://www.iso.org/obp>

— IEC Електропедія, доступна за адресою: <http://www.electropedia.org/>

3.1.1 Основні вимоги

3.1.1.1 оболонка (*shell*)

Тонкостінна конструкція, утворена криволінійною поверхнею, товщина якої, виміряна перпендикулярно до поверхні, є малою в порівнянні з іншими розмірами.

Примітка 1. Оболонка сприймає навантаження, в основному, за рахунок мембранних зусиль. Серединна поверхня може мати скінченні радіуси кривизни у кожній точці або нескінченний радіус кривизни в одному напрямку, наприклад, як у випадку циліндричної оболонки.

Примітка 2. У цьому стандарті оболонку визначено як алюмінієву конструкцію або конструкційний елемент, утворений зігнутими листами або пресованими виробами.

3.1.1.2 оболонка обертання (*shell of revolution*)

Оболонка, складена з декількох частин, кожна з яких є замкнутою осесиметричною оболонкою.

3.1.1.3 замкнута осесиметрична оболонка (*complete axisymmetric shell*)

Оболонка, форма якої визначена поворотом меридіональної твірної навколо однієї осі на кут 360° .

Примітка 1. Така оболонка може мати будь-яку довжину.

3.1.1.4 сегмент оболонки (*shell segment*)

Частина оболонки обертання із заданою оболонковою формою і постійною товщиною стінки.

Примітка 1. Прикладами оболонки обертання є: циліндр, зрізаний конус, сферичний сегмент, кільцева плита.

3.1.1.5 панель оболонки (*shell panel*)

Незамкнена осесиметрична оболонка, форма якої визначена

обертанням твірної навколо осі на кут менший, ніж 360° .

3.1.1.6 серединна поверхня (*middle surface*)

Поверхня, яка в кожній точці розташована посередині між внутрішньою і зовнішньою поверхнями оболонки.

Примітка 1. Якщо оболонка підкріплена лише на одній поверхні, за базову серединну поверхню все одно приймають серединну поверхню викривленої оболонкової пластини. Серединна поверхня є еталонною поверхнею для розрахунку і може перериватися у разі зміни товщини або в місцях з'єднання оболонок, спричиняючи появу ексцентриситета, який може суттєво впливати на реакцію оболонки.

3.1.1.7 стик (*junction*)

Місце, в якому сходяться два або більше сегменти оболонки.

Примітка 1. Стик може бути з елементом жорсткості або без нього: місце прикріплення кільцевого ребра жорсткості до оболонки можна вважати стиком.

3.1.1.8 стрингер (*stringer stiffener*)

Місцевий елемент жорсткості, розташований вздовж меридіану оболонки, що представляє собою твірну оболонки обертання.

Примітка 1. Стрингер застосовують для збільшення стійкості або для сприймання місцевих навантажень. Він не призначений для забезпечення основного опору згину від поперечного навантаження.

3.1.1.9 кільцеве ребро жорсткості (*ring stiffener*)

Місцевий елемент жорсткості, що проходить навколо окружності оболонки обертання через задану точку меридіану.

Примітка 1. Допускається, що у площині меридіану оболонки немає елементів жорсткості. Цей елемент потрібен для підвищення стійкості або для сприймання осесиметричних місцевих навантажень, що діють у площині кільця за допомогою осесиметричних нормальних сил. Він не призначений для забезпечення первинного опору згину.

3.1.1.10 опорне кільце (*base ring*)

Конструкційний елемент, який проходить навколо оболонки обертання в основі та забезпечує кріплення оболонки до фундаменту або іншого елемента конструкції.

Примітка 1. Воно призначене для практичного забезпечення передбачених граничних умов.

3.1.2 Окремі визначення щодо розрахунку на втрату стійкості

3.1.2.1 критичне напруження при втраті стійкості (*critical buckling load*)

Найменше біфуркаційне або граничне навантаження, визначене для ідеалізованих умов пружної роботи матеріалу, ідеальної геометрії, ідеального прикладання навантаження, ідеального обпирання, ізотропності матеріалу і відсутності залишкових напружень (розрахунок LBA).

3.1.2.2 критичне напруження при втраті стійкості (*critical buckling stress*)

Номінальне мембранне напруження, пов'язане з критичним пружним навантаженням при втраті стійкості

3.1.2.3 характеристичне напруження при втраті стійкості (*characteristic buckling stress*)

Номінальне мембранне напруження, пов'язане з втратою стійкості за непружної поведінки матеріалу та при наявності геометричних і конструкційних недосконалостей.

3.1.2.4 розрахункове напруження при втраті стійкості (*design buckling stress*)

Розрахункове значення напруження при втраті стійкості, визначене як частка від ділення характеристичного напруження при втраті стійкості на частковий коефіцієнт опору.

3.1.2.5 визначальне значення напруження (*key value of the stress*)

Значення напруження в нерівномірному полі напружень, що характеризує величину напруження при оцінюванні граничного стану при втраті стійкості.

3.1.2.6 клас допусків (*tolerance class*)

Клас вимог до геометричних допусків, використовуваних при виконанні робіт.

Примітка 1. Геометричні допуски для виконання робіт обумовлені виготовленням елементів та їх монтажем на будівельному майданчику.

3.2 Познаки

У цьому стандарті вжито познаки, зазначені в EN 1990, EN 1999-1-1, а також наведені нижче.

Примітка. Визначення додаткових познак наведено там, де вони зустрічаються.

Великі латинські літери

C — коефіцієнт для оцінювання несної здатності;

C_ϕ — жорсткість листів на розтяг у осьовому напрямку;

C_θ — жорсткість листів на розтяг у кільцевому напрямку;

$C_{\phi\theta}$ — жорсткість листів на розтяг у стані мембранного зсуву;

D_ϕ — згинальна жорсткість листів у осьовому напрямку;

D_θ — згинальна жорсткість листів на розтяг у кільцевому напрямку;

$D_{\phi\theta}$ — крутильно-згинальна жорсткість листів при крученні;

L — загальна довжина оболонки;

P_n — навантаження на одиницю довжини окружності по нормалі до оболонки;

P_x — навантаження на одиницю довжини окружності, що діє в меридіональному напрямі;

P_θ — навантаження на одиницю довжини окружності, що діє на

оболонку в кільцевому напрямі;

U_r — параметр допуску на некруглість;

U_0 — параметр допуску на початкові вм'ятини.

Рядкові латинські літери

$a_{(\dots)}$ — понижувальний коефіцієнт для врахування недосконалостей у разі оцінювання несної здатності;

d — внутрішній діаметр оболонки;

e — ексцентриситет між серединними поверхнями з'єднаних пластин;

f_{eq} — еквівалентне напруження фон Мізеса;

f_u — характеристичне значення граничної міцності на розтяг;

f_o — характеристичне значення умовної границі текучості;

k — калібрувальний коефіцієнт для нелінійного розрахунку;

$k_{(\dots)}$ — ступінь взаємодії виразів у рівняннях рівноваги;

l — довжина сегмента оболонки;

l_g — довжина датчика для вимірювання недосконалостей;

$l_{g,\theta}$ — довжина датчика для вимірювання недосконалостей у кільцевому напрямку;

$l_{g,w}$ — довжина датчика для вимірювання недосконалостей по ширині зварних швів;

l_R — обмежена довжина оболонки для оцінювання несної здатності;

m_x — меридіональний згинальний момент на одиницю ширини, див. рисунок 3.2;

$m_{x,Ed}$ — розрахункові значення меридіонального згинального моменту на одиницю ширини;

m_θ — кільцевий згинальний момент на одиницю ширини, див. рисунок 3.2;

$m_{\theta,Ed}$ — розрахункові значення кільцевого згинального моменту на одиницю ширини;

$m_{x\theta,Ed}$ — розрахункові значення крутного моменту зсуву на одиницю ширини;

n_x — меридіональне мембранне осьове зусилля на одиницю довжини, див. рисунок 3.2;

$n_{x,Ed}$ — розрахункові значення меридіонального мембранного осьового зусилля на одиницю довжини;

$n_{x\theta}$ — мембранне зсувне зусилля на одиницю довжини, див. рисунок 3.2;

$n_{x\theta,Ed}$ — розрахункові значення мембранного зсувного зусилля на одиницю довжини;

n_θ — кільцеве мембранне осьове зусилля на одиницю довжини, див. рисунок 3.2;

$n_{\theta,Ed}$ — розрахункові значення кільцевого мембранного осьового зусилля на одиницю довжини;

p_n — тиск, перпендикулярний до оболонки, див. рисунок 3.1;

p_x — меридіональне навантаження на поверхню, паралельне до оболонки, див. рис. 3.1;

p_θ — кільцеве навантаження на поверхню, паралельне до оболонки, див. рис. 3.1;

r — радіальна координата серединної поверхні, перпендикулярна до осі обертання;

t — товщина стінки оболонки;

$t_{\max}$ — максимальна товщина стінки оболонки у вузлі;

$t_{\min}$ — мінімальна товщина стінки оболонки у вузлі;

t_{ave} — середня товщина стінки оболонки у вузлі;

u — меридіональне переміщення, див. рисунок 3.1;

v — кільцеве переміщення, див. рисунок 3.1;

w — переміщення, перпендикулярне до поверхні оболонки, див. рисунок 3.1;

x — меридіональна координата, див. рисунок 3.1;

z — осьова координата, див. рисунок 3.1.

Великі грецькі літери

Δ — діапазон параметра за наявності змінних або циклічних дій;

Δw_0 — допуски, перпендикулярні поверхні оболонки;

θ — кільцева координата, див. рисунок 3.1;

Φ — меридіональний ухил: кут між віссю обертання та перпендикуляром до меридіана оболонки.

Рядкові грецькі літери

$\alpha_{(\dots)}$ — понижувальний коефіцієнт для врахування недосконалостей у разі оцінювання несної здатності;

α_R — розрахований коефіцієнт підсилення опору (використовується з нижніми індексами для позначення основи);

α_{Rpl} — коефіцієнт підсилення опору пластичній деформації (визначається як коефіцієнт запасу міцності до розрахункових навантажень);

α_{Rcr} — коефіцієнт підсилення критичного пружного навантаження під час втрати стійкості (визначається як коефіцієнт запасу міцності до розрахункових навантажень);

β — півкут при вершині конуса;

β_Φ — меридіональний поворот (див. 7.2);

μ — параметр зміцнення сплаву в кривих втрати стійкості оболонок;

σ_{eq} — еквівалентне напруження фон Мізеса;

σ_x — меридіональне мембранне напруження, див. рисунок 3.1;

$\sigma_{x,cr}$ — критичне меридіональне напруження при втраті стійкості;

$\sigma_{x,Ed}$ — розрахункові значення меридіонального мембранного напруження характерного для втрати стійкості (додатне при стиску);

$\sigma_{x,Rd}$ — опір розрахунковим меридіональним напруженням при втраті стійкості;

σ_{θ} — кільцеве мембранне напруження, див. рисунок 3.1;

$\sigma_{\theta,cr}$ — критичні кільцеві напруження при втраті стійкості;

$\sigma_{\theta,Ed}$ — розрахункові значення меридіонального мембранного напруження характерного для втрати стійкості (додатне при стиску);

$\sigma_{\theta,Rd}$ — опір розрахунковому кільцевому напруженню при втраті стійкості;

$\tau_{x\theta}$ — зсувне напруження у площині, див. рисунок 3.1;

τ_{cr} — критичне зсувне напруження при втраті стійкості;

τ_{Ed} — розрахункові значення зсувного мембранного напруження характерного для втрати стійкості;

τ_{Rd} — опір розрахунковому зсувному напруженню при втраті стійкості;

$\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ — меридіональне, кільцеве поперечне зсувне напруження від згину, див. рис. 3.1.

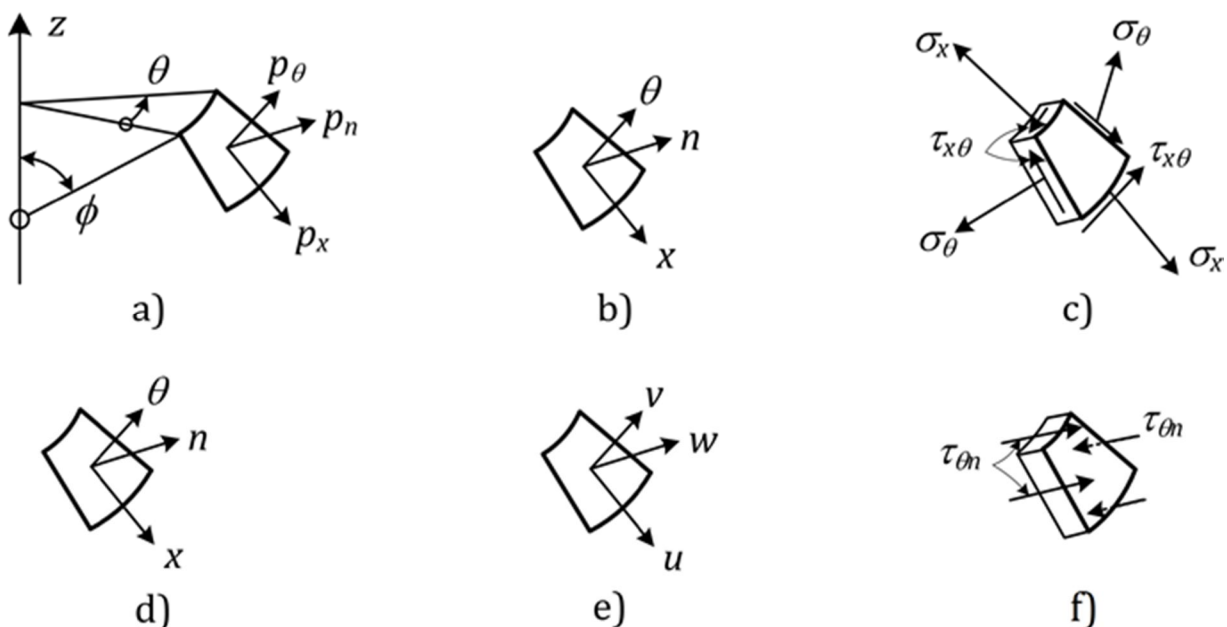
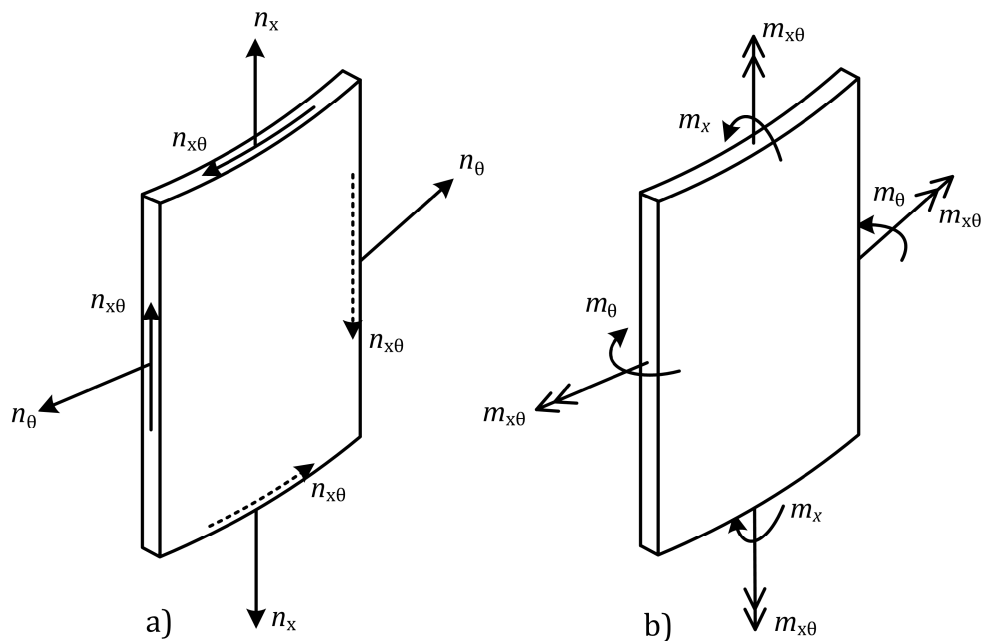


Рисунок 3.1 — Позначки для оболонок обертання

Умовні позначки:

- a) — поверхневий тиск
- b) — координати
- c) — мембранні напруження
- d) — напрями
 - θ = кільцевий
 - n = перпендикулярний
 - x = меридіональний
- e) — переміщення
- f) — поперечні зсувні зусилля

Рисунок 3.1 — аркуш 2



Умовні позначки:

- a) — результуючі мембранного напруження
- b) — результуючі згинального напруження

Рисунок 3.2 — Результуючі напруження в стінці оболонки (x — меридіональне, а θ — кільцеве)

3.3 Правило знаків

(1) За виключенням наведеного у параграфі (2), загальне правило знаків наступне:

— напрям назовні є додатнім;

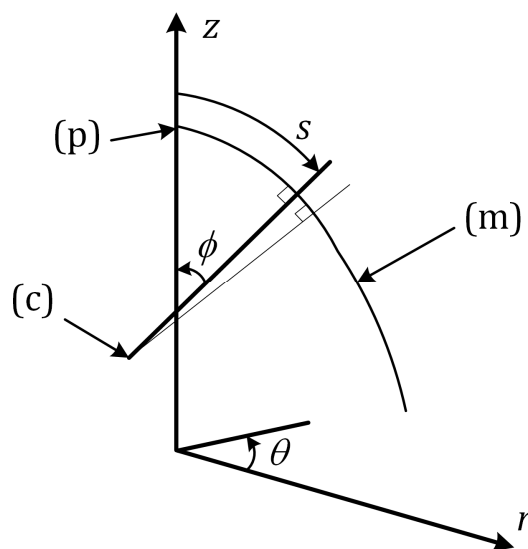
- внутрішній тиск є додатнім;
- переміщення назовні є додатним;
- розтягувальні напруження є додатними;
- зсувні напруження згідно Рис. 1.2.

(2) З метою спрощення, для розрахунку на втрату стійкості напруження стиску прийнято вважати додатними. У такому випадку як зовнішній так і внутрішній тиск приймають додатними.

3.4 Системи координат

(1) Загалом, для оболонкових конструкцій застосовується наступна циліндрична система координат (див. Рисунок 3.3):

- координата вздовж центральної осі оболонки обертання z ;
- радіальна координата r ;
- кільцева координата θ .



Умовні позначки:

- (p) — полюс;
- (m) — меридіан оболонки;
- (c) — миттєвий центр меридіональної кривизни.

Рисунок 3.3 — Система координат кільцевої оболонки

(2) Прийняті правила для меридіональних та кільцевих елементів, з'єднаних зі стінкою оболонки (див. рисунок 3.4), дещо різняться.

(3) Прийняті правила для меридіональних прямолінійних конструкційних елементів, з'єднаних зі стінкою оболонки (див. рисунок 3.4

а)) наступні:

— меридіональна координата місця прикріплення елементів циліндричної частини, воронки та даху; x ;

— вісь сильного згину (паралельна до полиць: вісь меридіонального згину); y ;

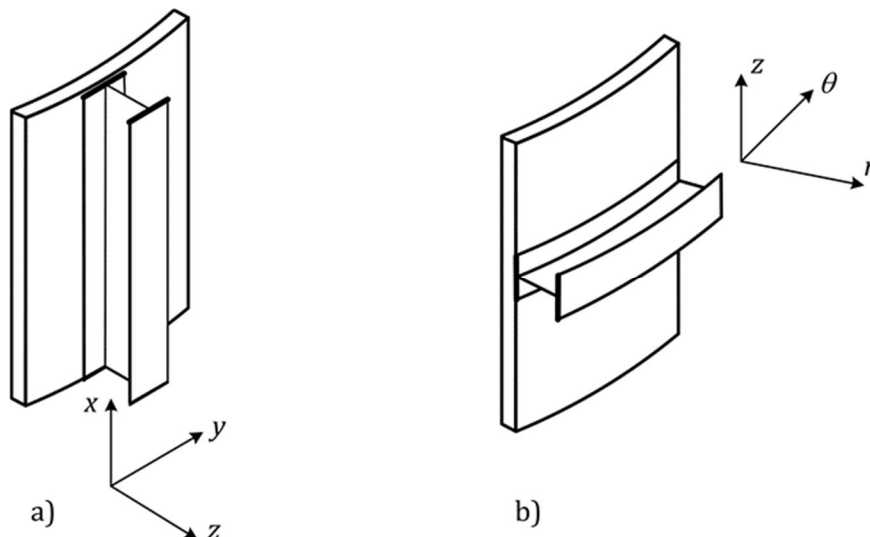
— вісь слабого згину (перпендикулярна до полиць). z ;

(4) Прийняті правила для кільцевих криволінійних конструкційних елементів, з'єднаних зі стінкою оболонки (див. рисунок 3.4 б)) наступні:

— кільцева координатна вісь (криволінійна) θ ;

— радіальна вісь (вісь згину в меридіональній площині) r ;

— меридіональна вісь (вісь кільцевого згину) z .



Умовні позначки:

а) — меридіональний елемент жорсткості;

б) — кільцевий елемент жорсткості.

Рисунок 3.4 — Місцева система координат для меридіональних та кільцевих елементів жорсткості оболонки

4 ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ

4.1 Загальні положення

(1) Проєктування оболонок потрібно виконувати у відповідності з вимогами, викладеними у EN 1990 та EN 1999-1-1.

(2) Для граничних станів за несною здатністю та за експлуатаційною

придатністю потрібно приймати відповідні часткові коефіцієнти.

(3) Для перевірки розрахунків за граничним станом за несною здатністю, частковий коефіцієнт γ_M потрібно приймати наступним чином:

- опір пластичній деформації та нестійкості: γ_{M1} ;
- пір пластини на розтяг при руйнуванні: γ_{M2} ;
- опір вузлів: див. у EN 1999-1-1.

Примітка. Значення γ_{Mi} , див. EN 1999-1-1.

4.2 Клас слідства і клас виконання

(1) Вибір класу наслідків, див EN 1990 і EN 1999-1-1, рекомендовано погоджувати спільним рішенням між проєктувальником і замовником з урахуванням національних вимог.

(2) Клас виконання (див. EN 1999-1-1) рекомендовано визначати у специфікації на виконання робіт.

5 МАТЕРІАЛИ ТА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

5.1 Властивості матеріалу

(1) EN 1999-1-5 стосується оброблених тиском матеріалів (сплавів та загартованих матеріалів), перелічених в EN 1999-1-1:2023, Таблицях 5.3 і 5.4, та в EN 1999-1-4:2023 Таблиця 5.1 для холодноформованих листів.

(2) Для умов експлуатації в температурному діапазоні від 80°C до 100°C рекомендовано приймати властивості матеріалів наведені в EN 1999-1-1.

(3) У загальному числовому розрахунку з урахуванням нелінійності матеріалу застосовна відповідна крива напружень-деформацій, що наведена в EN 1999-1-1:2023, Додаток F.

5.2 Розрахункові значення геометричних характеристик

(1) Товщину оболонки t рекомендовано приймати відповідно до вимог

стандартів EN 1999-1-1 та EN 1999-1-4.

(2) За базову поверхню для навантажень рекомендовано приймати серединну поверхню оболонки.

(3) Радіус r оболонки рекомендовано приймати як номінальний радіус серединної поверхні оболонки, виміряний перпендикулярно до осі обертання.

5.3 Геометричні допуски та геометричні недосконалості

(1) Рекомендовано розрізняти наступні геометричні відхилення поверхні оболонки від номінальної форми:

- некруглість (еліптичність) (відхил від круглої форми);
- ексцентриситети (відхилення від суцільної серединної поверхні в напрямку, перпендикулярному до оболонки вздовж стиків пластин);
- місцеві вм'ятини (місцеві відхилення перпендикулярно до номінальної серединної поверхні).

Примітка. EN 1090-3 містить вимоги до геометричних допусків для оболонкових конструкцій.

(2) Геометричні допуски пов'язані з опором втраті стійкості див. 8.2.2.

6 ДОВГОВІЧНІСТЬ

(1) Потрібно застосовувати основні вимоги, викладені у розділі 6 EN 1999-1-1:2023.

(2) Особливу увагу рекомендовано приділити випадкам, коли розглядають спільну роботу різних матеріалів, особливо якщо їх електрохімічний склад може спричинити появу корозії.

Примітка. Відомості щодо корозійної стійкості кріпильних виробів для категорій корозійної стійкості під дією природних факторів наведено у ISO 9223 та EN 1999-1-4.

(3) Також до уваги рекомендовано прийняти природні умови, що переважали з моменту виробництва, включаючи транспортування та

7 КОНСТРУКЦІЙНИЙ РОЗРАХУНОК

7.1 Геометричні характеристики

(1) Оболонка має бути представлена серединною поверхнею.

(2) У якості радіусу кривизни рекомендовано приймати номінальний радіус кривизни.

(3) Сукупність сегментів оболонки не рекомендовано розділяти на окремі сегменти для розрахунку, окрім випадків коли граничні умови для кожного сегмента вибрано так, щоб консервативно моделювати взаємодію між ними.

(4) Якщо це відповідає реальним умовам закріплення, в розрахункову модель може бути включено жорстке опорне кільце, призначене для передавання опорних зусиль на оболонку.

(5) Конструкційні ексцентриситети і уступи серединної поверхні оболонки рекомендовано включати до розрахункової моделі, якщо вони є причиною значного згину внаслідок ексцентрично прикладених результуючих мембранних напружень.

(6) Будь який ексцентриситет між серединними поверхнями сегментів оболонок на стиках між сегментами оболонки рекомендовано враховувати у розрахунковій моделі.

(7) Кільцеве ребро жорсткості рекомендовано вважати окремим конструкційним елементом оболонки, крім випадку коли крок кілець менший за $1,5\sqrt{rt}$.

(8) Оболонку з дискретно розташованими стрингерами дозволено розглядати як ортотропну оболонку постійної товщини, за умови, що відстань між стрингерами не перевищує $5\sqrt{rt}$.

(9) Гофровану (в осьовому чи кільцевому напрямку) оболонку дозволено розглядати як ортотропну оболонку постійної товщини, за

умови, що ширина гофри не перевищує $0,5\sqrt{rt}$ (див. А.7.7).

(10) В розрахунковій моделі оболонки дозволено нехтувати отворами, найбільший розмір яких менший за $0,5\sqrt{rt}$.

(11) Загальну стійкість конструкції в цілому рекомендовано визначати згідно положень EN 1993-3, EN 1993-4-1 або EN 1993-4-2, залежно від обставин.

7.2 Граничні умови

(1) Відповідні граничні умови рекомендовано використовувати у розрахунку для оцінки граничних станів згідно з умовами, визначеними в Таблиці 7.1. Спеціальні умови, необхідні для обчислень втрати стійкості, рекомендовано приймати за 8.2.

(2) Обмеженнями повороту на границях оболонки дозволено знехтувати під час моделювання граничного стану за несною здатністю в усіх випадках, коли руйнування відбувається далеко від закріплених кінців оболонки. Для невисоких і / або товстих оболонок, циліндрів з осьовим навантаженням, що мають клас допуску 4, і, загалом, у всіх випадках, коли можливе руйнування (наприклад, через втрату стійкості) поблизу закріплених кінців оболонки, відповідно до додатка А, під час розрахунку на втрату стійкості рекомендовано враховувати обмеження повороту.

(3) Рекомендовано перевірити граничні умови обпирання, щоб переконатися, що вони не спричиняють надмірну нерівномірність переданих зусиль і не створюють зусиль, ексцентричних щодо серединної поверхні корпусу.

(4) У випадку застосування глобального числового аналізу, граничну умову для нормального переміщення w рекомендовано також використовувати для кільцевого переміщення v , за винятком випадків, коли особливі обставини роблять це недоречним.

Таблиця 7.1 — Граничні умови для оболонок

Позначки граничних умов	Спрощена назва	Опис			Нормальні зміщення	Меридіонал ьні зміщення	Меридіонал ьний поворот
		радіальні	меридіональ ні	поворот			
BC1r	зашемле ння	обмежено	обмежено	обмежено	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi = 0$
BC1f		обмежено	обмежено	вільно	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC2r		обмежено	вільно	обмежено	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi = 0$
BC2f	шарнір	обмежено	вільно	вільно	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC3	вільний край	вільно	вільно	вільно	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$
Примітка. Кільцеве зміщення v тісно пов'язане зі зміщенням w, що є нормальним до поверхні, тому для цих двох параметрів окремі граничні умови не вказують.							

7.3 Дії та впливи навколишнього середовища

(1) Всі дії рекомендовано прикладати до серединної поверхні оболонки. Ексцентриситети навантаження рекомендовано представляти статичними еквівалентними зусиллями та моментами на серединній поверхні оболонки.

(2) Місцеві дії та місцеві ділянки дій не рекомендовано представляти еквівалентними рівномірно розподіленими навантаженнями, якщо не вказано інше.

(3) Додатково до дій і комбінацій дій, наведених у стандартах EN 1991 та EN 1990, у конструкційному розрахунку рекомендовано враховувати ті з наступних дій, які мають відношення до конструкції:

- місцеве осідання під стінками оболонки;
- місцеве осідання під дискретними опорами;
- однорідність / неоднорідність опори конструкції;
- перепад температур від однієї сторони конструкції до іншої;
- перепад температур зсередини конструкції назовні;
- вітрові впливи на отвори і прорізи;
- взаємодія вітрових впливів для груп конструкцій;
- з'єднання з іншими конструкціями;

— умови в процесі монтажу.

(4) Внаслідок того, що навантаження сприймаються мембранними зусиллями, оболонки можуть бути чутливими до певних змін геометричних характеристик, наприклад, до вм'ятин. Додатково до неминучих відхилів від геометрії при виготовленні, вм'ятини можуть бути викликані непередбаченими впливами під час експлуатації. Вразливість до вм'ятин зростає у місцях з порівняно тонкими перерізами елементів. У випадку, коли розміри вм'ятин перевищують значення, наведені у EN 1090-3, рекомендовано визначити їх наслідки для несної здатності.

(5) Рекомендовано виконувати періодичну перевірку геометрії, особливо для випадків високих класів допуску (3 або 4).

(6) Під час вибору принципів проєктування рекомендовано вжити заходи для уникнення ризику появи небажаних вм'ятин. Такими заходами, наприклад, можуть бути більш товста, ніж цього потребує розрахунок, стінка, або додатковий захист вразливих місць.

7.4 Результиуючі напружень та напруження

(1) За умови, що відношення радіуса до товщини є більшим за $(r/t)_{\min} = 25$, кривизну оболонки дозволено проігнорувати при розрахунку результиуючих напружень, спричинених напруженнями в стінці оболонки.

7.5 Види розрахунку

(1) Проєктування має бути засновано на одному або декількох видах розрахунку, наведених у Таблиці 7.2, залежно від граничного стану або інших обставин. Види розрахунку описано в Таблиці 7.3. Більш детально див. EN 1993-1-6.

Таблиця 7.2 — Види розрахунків оболонок

Види розрахунку		Теорія оболонок	Поведінка матеріалу	Геометрія оболонок
Розрахунок за мембранною теорією (<i>Membrane theory analysis; MTA</i>)	MTA	мембранна рівновага	не застосовно	Ідеальна ^a
Лінійно-пружний розрахунок оболонки (<i>Linear elastic shell analysis; LA</i>)	LA	лінійний згин і розтяг	лінійна	Ідеальна ^a
Лінійно-пружний розрахунок біфуркації (<i>Linear elastic bifurcation analysis; LBA</i>)	LBA	лінійний згин і розтяг	лінійна	Ідеальна ^a
Геометрично нелінійний пружний розрахунок (<i>Geometrically non-linear elastic analysis; GNA</i>)	GNA	нелінійна	лінійна	Ідеальна ^a
фізично нелінійний розрахунок (<i>Materially non-linear analysis; MNA</i>)	MNA	лінійна	нелінійна	Ідеальна ^a
Геометрично та фізично нелінійний розрахунок (<i>Geometrically and materially non-linear analysis; GMNA</i>)	GMNA	нелінійна	нелінійна	Ідеальна ^a
Геометрично нелінійний пружний розрахунок з урахуванням недосконалостей (<i>Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections; GNIA</i>)	GNIA	нелінійна	лінійна	неідеальна ^b
геометрично та фізично нелінійний розрахунок із урахуванням недосконалостей (<i>Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections; GMNIA</i>)	GMNIA	нелінійна	нелінійна	неідеальна ^b
^a Термін «ідеальна геометрія» означає, що в розрахунковій моделі застосовано номінальну геометрію без урахування геометричних відхилів. ^b Термін «неідеальна геометрія» означає, що в розрахунковій моделі враховані геометричні відхили (допуски) від номінальної геометрії.				

(2) Для розрахунку втрати стійкості можна використовувати два підходи:

— лінійно-пружний розрахунок біфуркації втрати стійкості для визначення біфуркаційного навантаження (LBA) ідеальної конструкції та подальшого застосування понижувальних коефіцієнтів відповідно до пункту 8.1 для врахування геометричної та фізичної нелінійності;

— повністю нелінійний розрахунок, що моделює геометричну та фізичну нелінійність (GMNIA), застосовуючи форму і амплітуду

геометричних недосконалостей, зазначених у EN 1090-3, та нелінійну розрахункову модель для залежності напруження-деформація.

Примітка. Щодо моделей залежностей напруження-деформація, див. EN 1999-1-1:2023, додаток F.

Таблиця 7.3 — Опис видів розрахунків оболонок

Розрахунок за мембранною теорією (MTA)	Розрахунок на дію розподілених навантажень за умови, що мембранні зусилля задовольняють умови рівноваги із зовнішніми навантаженнями.
Лінійно-пружний розрахунок (LA)	Розрахунок на основі теорії лінійно-пружного згину оболонки при малих деформаціях, за умови ідеальної геометрії.
лінійно-пружний біфуркаційний розрахунок (обчислення власних значень) (LBA)	Розрахунок, що оцінює лінійно-пружне власне значення біфуркації на основі малих прогинів, використовуючи теорію лінійно-пружного згину оболонок з припущенням ідеальної геометрії. Зверніть увагу, що в цьому контексті власний коефіцієнт не стосується видів коливань.
геометрично нелінійний пружний розрахунок (GNA)	Розрахунок на основі теорії згину оболонки з припущенням ідеальної геометрії та врахуванням нелінійної теорії великих прогинів і лінійно-пружних властивостей матеріалу.
Фізично нелінійний розрахунок (MNA)	Розрахунок, подібний до LA, однак з урахуванням нелінійних властивостей матеріалу. Для зварних конструкцій рекомендовано моделювати матеріал у зоні термічного впливу.
Геометрично та фізично нелінійний розрахунок (GMNA)	Розрахунок на основі теорії згину оболонки з припущенням ідеальної геометрії та врахуванням нелінійної теорії великих прогинів і нелінійних властивостей матеріалу. Для зварних конструкцій рекомендовано моделювати матеріал у зоні термічного впливу.
Геометрично нелінійний пружний розрахунок з урахуванням недосконалостей (GNIA) ^a	Розрахунок, подібний до GNA, однак з урахуванням недосконалої геометрії.
Геометрично та фізично нелінійний розрахунок із урахуванням недосконалостей (GMNIA)	Розрахунок, подібний до GMNA, однак з урахуванням недосконалої геометрії.
^a Цей вид розрахунку у цьому стандарті не розглядається. Однак, його наведено для представлення повного переліку видів розрахунку оболонок.	

8 ГРАНИЧНИЙ СТАН ЗА НЕСНОЮ ЗДАТНІСТЮ

8.1 Опір поперечного перерізу

8.1.1 Розрахункові значення напружень

(1) У кожній точці конструкції розрахункове значення еквівалентного напруження фон Мізеса, $\sigma_{eq,Ed}$, рекомендовано приймати як найбільше напруження, визначене в ході конструкційного розрахунку.

(2) При використанні мембранної теорії розрахунку (МТА), отримане в результаті двовимірне поле результуючих напружень $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$ дозволено представляти еквівалентним розрахунковим напруженням $\sigma_{eq,Ed}$, обчисленим за формулою (8.1):

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed}n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (8.1)$$

(3) Якщо застосовано лінійно-пружний розрахунок (LA) або геометрично нелінійний пружний розрахунок (GNA), результуюче двовимірне поле напружень може бути представлене еквівалентним розрахунковим напруженням фон Мізеса, заданим формулами (8.2) — (8.4):

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad (8.2)$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4} \right), \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4} \right) \quad (8.3)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4} \right), \quad \tau_{xn,Ed} = \frac{q_{xn,Ed}}{t}, \quad \tau_{\theta n,Ed} = \frac{q_{\theta n,Ed}}{t}, \quad (8.4)$$

де

η — коригувальний коефіцієнт непружної роботи матеріалу в залежності від жорсткості або пластичності сплаву.

Примітка 1. Наведені вище вирази дають спрощене консервативне еквівалентне напруження для проектування.

Примітка 2. Рекомендації щодо значень η наведено в EN 1999-1-1: 2023, додаток К, в залежності від властивостей сплаву (деформаційне зміцнення і пластичність).

(4) Рекомендовано приймати значення η , відповідні коефіцієнту геометричної форми $\alpha_0 = 1,5$.

(5) Значення $\tau_{xn,Ed}$ і $\sigma_{xn,Ed}$ зазвичай дуже малі і не впливають на опір, тому ними, як правило, можна знехтувати.

8.1.2 Розрахункове значення опору

(1) Еквівалентну розрахункову міцність фон Мізеса рекомендовано визначати за формулами (8.5) і (8.6):

$$f_{eq,Rd} = \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \text{ у перерізі без зони термічного впливу} \quad (8.5)$$

$$f_{eq,Rd} = \min \left(\frac{\rho_{u,haz} f_u}{\gamma_{M2}}, \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \right) \text{ у перерізі із зоною термічного впливу} \quad (8.6)$$

де

f_o — характеристичне значення умовної границі текучості, як наведено у EN 1999-1-1;

f_u — характеристичне значення граничної міцності, як наведено у EN 1999-1-1;

$\rho_{u,haz}$ — співвідношення між границею міцності на розтяг в зоні термічного впливу та в основному матеріалі, як зазначено в EN 1999-1-1.

γ_{M1} , γ_{M2} — часткові коефіцієнти опору, наведені в 4.1(3).

(2) Ефект отворів під кріпильні вироби рекомендовано врахувати у відповідності зі стандартом EN 1999-1-1.

8.1.3 Обмеження за напруженням

(1) Потрібно, щоб під час перевірки цього граничного стану розрахункове напруження задовольняло умову:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Ed} \quad (8.7)$$

8.1.4 Проектування за допомогою числового аналізу

(1) Розрахунковий опір межі пластичності рекомендовано визначати

через коефіцієнт посилення опору α_R , застосований для розрахункових значень комбінацій дій для відповідних розрахункових ситуацій.

(2) Розрахункові значення дій рекомендовано визначати згідно з 7.3.

(3) Для фізично нелінійного розрахунку (MNA) і геометрично та фізично нелінійного розрахунку (GMNA), що ґрунтуються на розрахунковій границі текучості f_o/γ_M , на оболонку мають впливати розрахункові значення навантажень, із поступовим збільшенням на коефіцієнт підсилення опору α_R до досягнення границі міцності.

(4) Для фізично нелінійного розрахунку (MNA), коефіцієнт підсилення опору $\alpha_{R,MNA}$ дозволено приймати як більше значення, отримане під час розрахунку. Ефект деформаційного зміцнення може бути враховано за умови, що прийнято відповідне граничне значення допустимої деформації матеріалу.

(5) Для геометрично і фізично нелінійного розрахунку (GMNA), якщо він прогнозує максимальне навантаження, а потім його зменшення, для визначення коефіцієнта запасу $\alpha_{R,GMNA}$ рекомендовано застосовувати максимальне значення. Якщо розрахунок GMNA не передбачає максимального навантаження, але показує поступово зростаючу залежність «дія–переміщення» (без деформаційного зміцнення матеріалу або з ним), коефіцієнт запасу $\alpha_{R,GMNA}$ рекомендовано приймати не більшим ніж значення, за якого максимальна еквівалентна пластична деформація в конструкції набуває граничного значення деформації для сплаву, як наведено у розділі 5 EN 1999-1-1:2023. Для потреб проєктування граничне значення пластичної деформації, що дорівнює $5(f_o/E)$ або $10(f_o/E)$ дозволено приймати в залежності від характеристик пластичності сплаву.

(6) Потрібно щоб остаточне значення α_R отримане в результаті розрахунку відповідало умові (8.8):

$$\alpha_R \geq 1,0$$

8.2 Опір втраті стійкості

8.2.1 Загальні положення

(1) Рекомендовано враховувати всі важливі комбінації дій, що призводять до стискальних мембранних напружень або зсувних мембранних напружень у стінці оболонки.

(2) Для розрахунку на втрату стійкості меридіональні та кільцеві стискальні напруження і результуючі напруження рекомендовано приймати додатними.

(3) Особливу увагу рекомендовано приділити граничним умовам, що мають відношення до приросту переміщень через втрату стійкості (на відміну від переміщень ще до втрати стійкості). Приклади відповідних граничних умов показано на Рисунку 8.1.

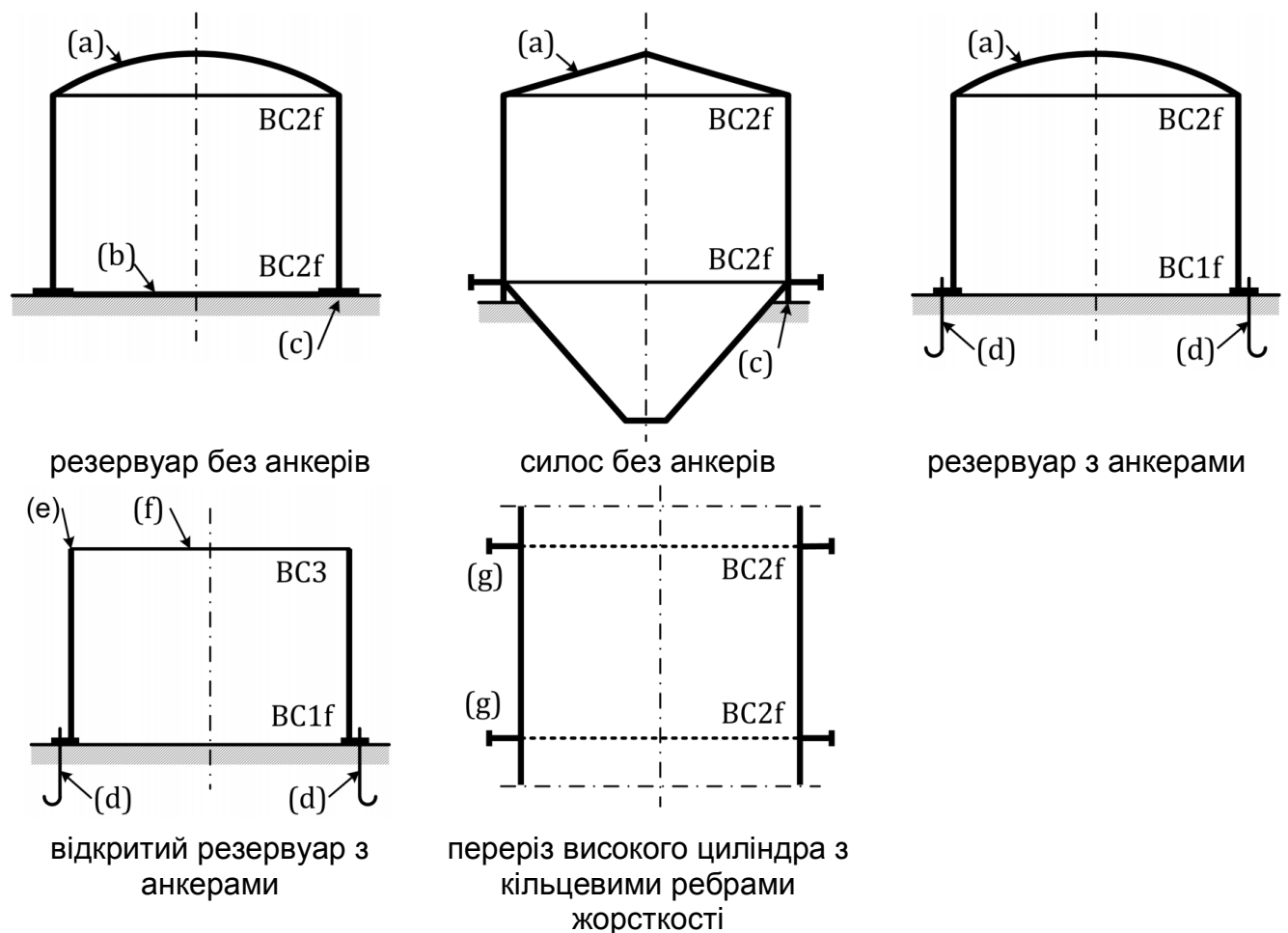


Рисунок 8.1 — Схематичні приклади граничних умов для граничного стану за втратою стійкості

Умовні позначки:

- (a) — дах
- (b) — дно резервуара
- (c) — без анкерування
- (d) — близько розміщені анкери
- (e) — без кільця жорсткості
- (f) — вільний край
- (g) — кільцеве ребро жорсткості

Рисунок 8.1 — аркуш 2

8.2.2 Геометричні допуски, що відповідають втраті стійкості

(1) Якщо розгляданим граничним станом за несною здатністю є втрата стійкості, рекомендовано дотримуватися меж геометричних допусків, наведених у EN 1090-3.

Примітка 1. Визначені нижче розрахункові напруження при втраті стійкості, враховують недосконалості, що базуються на геометричних допусках, які мають бути дотримані під час виконання робіт.

Примітка 2. У EN 1090-3 наведено геометричні допуски, які суттєво впливають на безпеку конструкції.

(2) Клас допуску (Клас 1, Клас 2, Клас 3 або Клас 4) рекомендовано вибирати як залежно від наявної комбінації навантажень, так і вимог щодо допусків, наведених у EN 1090-3. Опис кожного класу стосується лише оцінювання міцності.

(3) Кожен із видів недосконалостей рекомендовано класифікувати окремо, залежно від визначеного класу допусків; найнижчий наявний клас, в результаті, визначає весь алгоритм проектування.

(4) Різні види допусків можна розглядати незалежно; врахування взаємних впливів зазвичай не вимагається.

8.2.3 Оболонка під дією стиску і зсуву

8.2.3.1 Розрахункові значення напружень

В умовах чистого осесиметричного навантаження і обпирання, а також для інших простих комбінацій навантажень, зазвичай дозволено використовувати мембранну теорію. Максимальні значення розрахункових значень напружень $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, та τ_{Ed} , обчислені за допомогою лінійного розрахунку оболонок (LA), рекомендовано приймати як визначальні значення стискальних та зсувних мембранних навантажень, за винятком особливих положень, наведених у додатку А.

Примітка. У деяких випадках (наприклад, для стінок змінної товщини під дією кільцевого стиску, див. Додаток А.4.3) визначальні значення мембранних напружень є помилковими і перевищують реальні максимальні значення.

8.2.3.2 Міцність при втраті стійкості

(1) Розрахункові напруження при втраті стійкості рекомендовано визначати за формулами (8.9) — (8.11):

$$\sigma_{x,Rd} = \alpha_x \rho_{x,w} \chi_{x,perf} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (8.9)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_{\theta} \rho_{\theta,w} \chi_{\theta,perf} \frac{f_o}{\gamma_{M1}} \quad (8.10)$$

$$\tau_{Rd} = \alpha_{\tau} \rho_{\tau,w} \chi_{\tau,perf} \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (8.11)$$

для непідкріплених оболонок і за формулами (8.11) — (8.13):

$$n_{x,Rd} = \alpha_x \chi_{x,perf} \frac{n_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (8.12)$$

$$p_{n,Rd} = \alpha_{\theta} \chi_{\theta,perf} \frac{p_{n,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (8.13)$$

для підкріплених та/або гофрованих оболонок, де

$n_{x,Rk}$ — осьове граничне зминання підкріпленої оболонки;

$p_{n,Rk}$ — рівномірний тиск від граничного зминання підкріпленої або торо-конічної чи торо-сферичної оболонки;

α_i — понижувальний коефіцієнт для врахування недосконалостей за

додатком А;

$p_{i,w}$ — понижувальний коефіцієнт для зон термічного впливу відповідно до 8.2.4.4. Для оболонок без зварних швів $p_{i,w} = 1$;

$\chi_{i,perf}$ — понижувальний коефіцієнт для врахування втрати стійкості ідеальної оболонки, наведеної в (2);

γ_{M1} — частковий коефіцієнт опору (див. 4.1 (3)).

Примітка 1. Формула (8.13) також дійсна для торо-конічних і торо-сферичних оболонок, див. додаток В

Примітка 2. Для α_i для торо-конічних і торо-сферичних оболонок, див. додаток В

Примітка 3. Для гофрованих у кільцевому напрямку стінок з меридіональними елементами жорсткості застосовують А.7.6.2(3).

(2) Понижувальний коефіцієнт для втрати стійкості ідеальної оболонки рекомендовано визначати за формулами (8.14) і (8.15):

$$\chi_{i,perf} = \frac{1}{\varphi_i + \sqrt{\varphi_i^2 - \bar{\lambda}_i^2}}, \text{ але } \chi_{i,perf} \leq 1,00 \quad (8.14)$$

з:

$$\varphi_i = 0,5(1 + \mu_i(\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}) + \bar{\lambda}_i^2), \quad (8.15)$$

де

μ_i — параметр, що залежить від характеристик сплаву та комбінацій навантажень, наведений у Додатку А;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ — умовна гнучкість для граничного зминання за додатком А;

i — індекс, що має бути замінений на x , θ or τ , залежно від виду навантаження.

(3) Параметр гнучкості оболонки для різних складових напруження непідкріплених оболонок рекомендовано визначати за формулами (8.16) — (8.18):

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_o}{\sigma_{x,cr}}} \quad (8.16)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_o}{\sigma_{\theta,cr}}} \quad (8.17)$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_o}{\sqrt{3}\tau_{cr}}} \quad (8.18)$$

Параметр гнучкості оболонки для підкріпленої та/або гофрованої стінки рекомендовано обчислювати за формулами (8.18) — (8.20):

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{n_{x,Rk}}{n_{x,cr}}} \quad (8.19)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{p_{n,Rk}}{p_{n,cr}}} \quad (8.20)$$

де

$\sigma_{x,cr}$, $\sigma_{\theta,cr}$ і τ_{cr} — критичні напруження при втраті стійкості, які наведено у додатку А, або обчислено за допомогою лінійно-пружного біфуркаційного розрахунку (обчислення власних значень) (LBA);

$n_{x,cr}$, $p_{n,cr}$ — результуючі критичні напруження при втраті стійкості для підкріплених або торо-конічних або торо-сферичних оболонок, як наведено у додатку А, або обчислено за допомогою лінійно-пружного біфуркаційного розрахунку (обчислення власних значень) (LBA).

Примітка 1. Формули (8.19) і (8.20) також дійсні для торо-конічних і торо-сферичних оболонок, див. додаток В. Примітка 2 $p_{n,cr}$ для торо-конічних і торо-сферичних оболонок, див. додаток В

8.2.3.3 Міцність при втраті стійкості

(1) Хоча втрата стійкості не є виключно наслідком викликаной напруженнями відмови, перевірку міцності при втраті стійкості дозволено представляти обмеженням розрахункових величин мембранних та

результуючих напружень. Впливом згинальних напружень на міцність при втраті стійкості можна знехтувати за умови, що вони виникають у результаті ефекту сумісності граничних умов. Особливу увагу рекомендовано приділяти згинальним напруженням, обумовленим місцевими навантаженнями або температурними градієнтами.

(2) Залежно від режиму навантаження і напружень рекомендовано виконати одну або декілька наступних перевірок для визначальних значень окремих складових мембранного напруження:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (8.21)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (8.22)$$

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd} \quad (8.23)$$

(3) Якщо в розгляданій розрахунковій ситуації виникає більше одного із трьох складових мембранних напружень, обумовлених втратою стійкості, рекомендовано виконати перевірку взаємодії для складного мембранного напруженого стану, задану формулами (8.24) і (8.25):

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_{\theta}} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}}\right)^{k_{\tau}} \leq 1,00 \quad (8.24)$$

де $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ і τ_{Ed} — обумовлені взаємодією групи значущих величин стискальних і зсувних мембранних напружень в оболонці. Параметри взаємодії k_x , k_{θ} , k_{τ} і k_i , рекомендовано приймати як:

$$k_x = 1 + \chi_x^2$$

$$k_{\theta} = 1 + \chi_{\theta}^2$$

$$k_{\tau} = 1,5 + 0,5\chi_{\tau}^2$$

$$k_i = (\chi_x \chi_{\theta})^2 \quad (8.25)$$

(4) Для непідкріплених циліндрів під спільною дією кільцевого стиску та зсуву, параметри взаємодії дозволено обчислити за формулою А.3.6.

(5) Вищенаведені правила можуть інколи бути дуже консервативними, але вони враховують два крайніх випадки, які добре зарекомендували свою надійність для великої кількості випадків: а) у дуже тонких оболонках

взаємодія між σ_x і σ_θ є лінійною; та b) у дуже товстих оболонках взаємодію між напруженнями дозволено сформулювати через еквівалентні напруження фон Мізеса або альтернативне рівняння взаємодії, як наведено у EN 1999-1-1.

(6) якщо $\sigma_{x,Ed}$ або $\sigma_{\theta,Ed}$ діють на розтяг, їх значення у виразі (8.24) рекомендовано приймати рівними нулю.

Примітка. Для стиснутих в осьовому напрямку циліндрів із внутрішнім тиском (що викликає кільцевий розтяг), у додатку А наведено особливі положення. Результирує значення $\sigma_{x,Rd}$ враховує як підсилюючий ефект, внутрішнього тиску на опір пружній втраті стійкості, так і послаблюючий ефект явища пружно-пластичності «слонової ноги» (див. А.3.5.2). Якщо зусилля розтягу $\sigma_{\theta,Ed}$, у формулі (8.24) прийняти рівним нулю, то отримаємо точне представлення міцності при втраті стійкості.

(7) Місця прикладання і значення кожного з обумовлених втратою стійкості мембранних напружень, застосовані разом у виразі (8.24), наведено у додатку А.

8.2.4 Ефекти зварювання

8.2.4.1 Загальні положення

(1) У проєктуванні алюмінієвих оболонкових конструкцій рекомендовано дотримуватись загальних критеріїв і вимог до зварних конструкцій, викладених у EN 1999-1-1.

(2) Під час проєктування зварних оболонкових конструкцій з використанням деформаційно-зміцнених або штучно зістарених дисперсійно-тверднучих сплавів, рекомендовано враховувати зниження міцнісних властивостей поблизу зварних швів, тобто в зоні термічного впливу. Винятки до цього правила наведено у EN 1999-1-1.

(3) Для розрахункових цілей прийнято допущення, що у всій зоні термічного впливу міцнісні характеристики знижуються до постійного рівня.

Примітка. Хоча послаблення в основному впливає на умовну границю текучості

та границю міцності матеріалу на розтяг, його вплив на стиснуті зони оболонок, що схильні до втрати стійкості, в залежності від конструктивної гнучкості та властивостей сплаву, може виявитись досить значним.

(4) Там, де це можливо, рекомендовано уникати зварних швів у великих непідкріплених деталях, що перебувають під дією стиску.

Примітка 1. Ефект знеміцнення, обумовлений зварюванням, більш значний для втрати стійкості оболонок у пластичному діапазоні. Крім того, локальні зварні шви в місцях, що піддаються ризику втрати стійкості, можуть значно знизити опір втраті стійкості через зону термічного впливу.

Примітка 2. Ефект знеміцнення зони термічного впливу для деяких сплавів, що піддаються термічній обробці, може бути зменшено за допомогою штучного старіння, яке застосовують після зварювання, див. EN 1999-1-1.

(5) В розрахункових цілях зварювання дозволено розглядати як смуги впоперек поверхні оболонки, вплив яких поширюється безпосередньо навколо зварного шва. За межами цієї зони міцнісні властивості миттєво відновлюються в повному обсязі. Наявність таких зон може спричинити передчасний розвиток пластичних деформацій під дією втрати стійкості.

(6) Для всіх зварних швів, що прямо чи опосередковано знаходяться під впливом стискальних напружень, рекомендовано перевірити вплив обумовленого зварюванням знеміцнення на опір втраті стійкості оболонки, відповідно до правил 8.2.4.2.

8.2.4.2 Ступінь знеміцнення

(1) Ступінь обумовленого зварюванням знеміцнення рекомендовано виражати за допомогою понижувальних коефіцієнтів $\rho_{o,haz}$ і $\rho_{u,haz}$, заданих співвідношеннями формули (8.26):

$$\rho_{o,haz} = f_{o,haz}/f_o \text{ та } \rho_{u,haz} = f_{u,haz}/f_u, \quad (8.26)$$

що відповідають відношенням характеристичного значення умовної границі текучості $f_{o,haz}$ (гранична міцність $f_{u,haz}$) у зоні термічного впливу до

такого ж значення у основному матеріалі f_o (f_u).

(2) Характеристичні значення міцності $f_{o,haz}$ та $f_{u,haz}$, і значення $\rho_{o,haz}$ та $\rho_{u,haz}$ наведено у EN 1999-1-1:2023, таблиця 5.3 для листів, смуг та пластин з деформівних алюмінієвих сплавів, і у таблиці 5.4 для пресованих виробів.

(3) Тривалість відновлення матеріалу після зварювання рекомендовано оцінювати відповідно до положень EN 1999-1-1.

8.2.4.3 Розміри зони термічного впливу

(1) Рекомендовано дотримуватись загальних позначень меж зони термічного впливу, наведених у EN 1999-1-1

(2) Під час перевірки на втрату стійкості, вважають, що зона термічного впливу у листах оболонки простягається на відстань b_{haz} у будь-якому напрямку від зварного шва, виміряну перпендикулярно від центральної лінії стикового шва або від точки перетину зварюваних поверхонь для кутових швів, (див. рисунок 8.2).

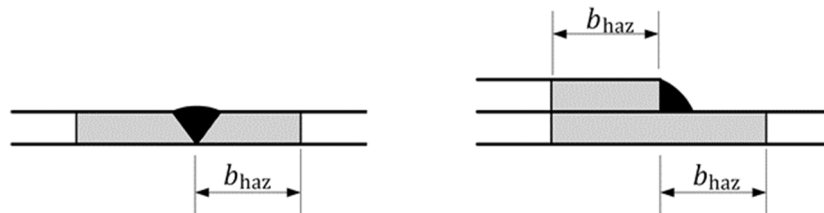


Рисунок 8.2 — Розміри зони термічного впливу для листів оболонки

8.2.4.4 Опір втраті стійкості непідкріплених зварних оболонок

(1) Опір втраті стійкості непідкріплених зварних оболонок рекомендовано оцінювати у місцях наявності у оболонках результуючих напружень стиску, що діють у нерозкріплених збоку зварних панелях.

(2) Перевірки впливу зварювання на опір втраті стійкості дозволено не виконувати, якщо всі шви в оболонці паралельні до результуючих стискальних напружень, що діють у конструкції у будь-якій розрахунковій ситуації, за умови, що понижувальний коефіцієнт $\rho_{o,haz}$, обумовлений

зоною термічного впливу, не нижчий за 0,60.

(3) Вплив зварювання на опір втраті стійкості дозволено визначати за допомогою методу геометрично і фізично нелінійного розрахунку з урахуванням недосконалостей (GMNIA), що враховує фактичні властивості основного матеріалу та матеріалу у зоні термічного впливу.

(4) Якщо неможливо виконати точний розрахунок GMNIA, то опір втраті стійкості оболонки дозволено обчислювати за спрощеним методом, а саме через понижувальний коефіцієнт, який визначають зі співвідношення $\rho_{i,w} = \chi_{i,w} / \chi_i$ між коефіцієнтом втрати стійкості звареної конструкції $\chi_{w,i}$ і таким же коефіцієнтом для незвареної конструкції χ_i .

Примітка 1. Результируючі стискальні напружень у оболонках можуть виникати не тільки через стиск, а також через зовнішній тиск, зсув і зосереджені навантаження. Незалежно від умов навантаження, до зварних швів, що є ортогональними до результируючих стискальних напружень, застосовують понижувальні коефіцієнти $\chi_{w,i}$, оскільки вони можуть створити концентроване джерело пластичної деформації.

Примітка 2. Індекс «i» у (4) та (5) замінюють на «x», «θ» або «τ» залежно від того, чи понижувальні коефіцієнти χ and ρ стосуються осьового стиску, кільцевого стиску чи зсуву відповідно.

(5) Понижувальний коефіцієнт, що враховує знеміцнення матеріалу в зоні термічного впливу для оболонкових конструкцій визначають за формулами (8.27) та (8.28):

$$\rho_{i,w} = \omega_0 + (1 - \omega_0) \frac{\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}}{\bar{\lambda}_{i,w} - \bar{\lambda}_{i,0}} \text{ але } \rho_{i,w} \leq 1 \text{ і } \rho_{i,w} \geq \omega_0, \quad (8.27)$$

де

$$\omega_0 = \frac{\rho_{u,haz} f_u / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \text{ але } \omega_0 \leq 1 \quad (8.28)$$

$\rho_{u,haz}$ і $\rho_{o,haz}$ — понижувальні коефіцієнти для зони термічного впливу, значення яких приймають за таблицями 5.3 або 5.4 EN 1999–1-1:2023;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ — параметр умовної гнучкості для граничного зминання для

розгляданої розрахункової ситуації з додатка А;

$\bar{\lambda}_{i,w}$ — граничне значення параметру умовної гнучкості, після перевищення якого вплив зварного шва на опір втраті стійкості зникає, задане за формулою

$$\bar{\lambda}_{i,w} = 1,39(1 - \rho_{o,haz})(\bar{\lambda}_{i,w,0} - \bar{\lambda}_{i,0}), \text{ але } \bar{\lambda}_{i,w} \leq \bar{\lambda}_{i,w,0}, \text{ див рисунок 8.3;}$$

$\bar{\lambda}_{i,w,0}$ — верхня межа абсолютної гнучкості для ефекту зварного шва, що залежить від сполучень навантажень, конструкційного матеріалу та класу допусків оболонки, як зазначено у таблиці 8.5;

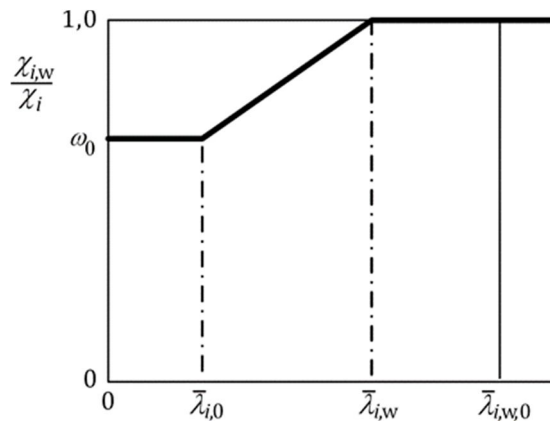


Рисунок 8.3 — Визначення понижувального коефіцієнта $\rho_{i,w}$ обумовленого зоною термічного впливу

Таблиця 8.5 — Значення $\bar{\lambda}_{i,w,0}$ для відповідних навантажень, визначених у додатку А

Клас допусків	Осьовий стиск $\bar{\lambda}_{x,w,0}$		Кільцевий тиск $\bar{\lambda}_{x,w,0}$		Кручення та зсув $\bar{\lambda}_{\tau,w,0}$	
	Матеріал класу А	Матеріал класу В	Матеріал класу А	Матеріал класу В	Матеріал класу А	Матеріал класу В
Клас 1	0,8	0,7	1,2	1,1	1,4	1,3
Клас 2	1,0	0,9	1,3	1,2	1,5	1,4
Клас 3	1,2	1,1	1,4	1,3	1,6	1,5
Клас 4	1,3	1,2	-	-	-	-

8.2.4.5 Опір втраті стійкості підкріплених зварних оболонок

Якщо елементи жорсткості достатньо обмежують поперечні переміщення зварюваних панелей, то перевірку впливу зварних швів, що з'єднують елементи жорсткості з оболонкою, на втрату стійкості дозволяється не проводити. В іншому випадку застосовують положення

8.2.5 Проектування за допомогою числового аналізу

(1) Тут дозволено застосувати процедуру, наведену в 7.5 та 8.1.4 для геометрично і фізично нелінійного розрахунку з урахуванням недосконалостей (GMNIA). Розрахунок GMNIA дозволено виконувати як альтернативний до методу, наведеному у 8.2.3, за умови прийняття в якості початкових геометричних недосконалостей максимальних значень допусків з 8.2.2.

(2) Для зварних конструкцій рекомендовано моделювати матеріал у зоні термічного впливу, див. розділи 8.2.4.2, 8.2.4.3 і 8.2.4.4.

9 ГРАНИЧНІ СТАНИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ

9.1 Загальні положення

Правила для граничних станів експлуатаційної придатності, наведені у EN 1999-1-1, також застосовні до оболонкових конструкцій.

9.2 Прогини

(1) Прогини дозволено розраховувати, на основі припущення щодо пружної поведінки конструкції.

(2) Згідно з EN 1990 граничні прогини рекомендовано визначати для кожного проєкту і погоджувати із замовником.

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

ФОРМУЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ОБОЛОНКИ НА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ

A.1 Застосування цього додатка

(1) Цей обов'язковий додаток містить додаткові положення до пунктів 7.2, 8.2.3.1, 8.2.3.2, 8.2.3.3 і 8.2.4.4, що стосуються формул для розрахунку оболонки на втрату стійкості.

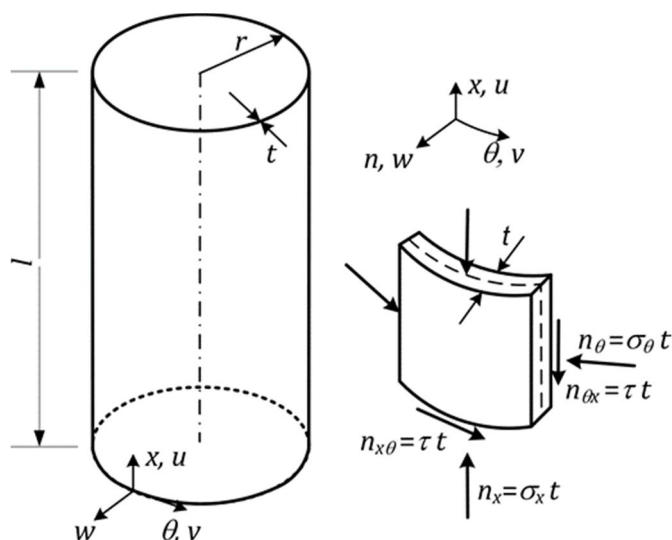
A.2 Сфера та область застосування

(1) У цьому обов'язковому додатку наведено формули для розрахунку оболонки на втрату стійкості. Він охоплює непідкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки, непідкріплені циліндричні оболонки із ступінчастою товщиною стінки, непідкріплені циліндричні оболонки, з'єднані внапусток, непідкріплені конічні оболонки, підкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки і непідкріплені сферичні оболонки під дією рівномірного кільцевого стиску.

A.3 Непідкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки

A.3.1 Познаки та граничні умови

(1) Загальні познаки наведено на рисунку А.1.



Умовні позначки:

l — висота циліндра між закріпленнями;

r — радіус серединної поверхні циліндра;

t — товщина стінки оболонки.

Рисунок А.1 — Геометричні характеристики циліндра, мембранні та результуючі напруження

(2) Граничні умови рекомендовано приймати такими, як наведено у 7.2 та 8.2.1.

А.3.2 Меридіональний (осьовий) стиск

А.3.2.1 Загальні положення

Циліндри дозволено не перевіряти на меридіональний стиск при втраті стійкості, якщо задовольняється умова (А.1) :

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_0} \quad (\text{А. 1})$$

А.3.2.2 Критичні меридіональні напруження при втраті стійкості

(1) Формули (А.2) — (А.5) дозволено застосовувати тільки для оболонок з граничними умовами ВС 1 або ВС 2 на обох краях.

(2) Довжину сегмента оболонки рекомендовано виражати через безрозмірний параметр ω , заданий формулою (А.2):

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (\text{A.2})$$

(3) Критичні меридіональні напруження при втраті стійкості C_x за таблицею А.1 рекомендовано обчислювати за формулою (А.3):

$$\sigma_{x,cr} = 0,605 E C_x t / r \quad (\text{A.3})$$

Таблиця А.1 — Коефіцієнт C_x для критичних меридіональних напружень при втраті стійкості

Циліндричні оболонки	$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}$	Коефіцієнт C_x
Низькі	$\omega \leq 1,7$	$C_x = 1,36 - 1,83/\omega + 2,07/\omega^2$
Середньої висоти	$1,7 < \omega < 0,5 r/t$	$C_x = 1$
Високі	$\omega \geq 0,5 r/t$	$C_x = 1 - \frac{0,2}{C_{xb}} \left(2\omega \frac{t}{r} - 1 \right)$ але $C_x \geq 0,6$ Де C_{xb} наведено у таблиці А.2

Таблиця А.2 — Параметр C_{xb} для врахування впливу граничних умов для високих циліндрів

Варіант	Край циліндра	Граничні умови	C_{xb}
1	край 1 край 2	BC 1 BC 1	6
2	край 1 край 2	BC 1 BC 2	3
3	край 1 край 2	BC 2 BC 2	1
Примітка. BC 1 охоплює як BC1f так і BC1r, див. таблицю 7.1.			

(4) Для високих циліндрів, наведених у Таблиці А.1, і що відповідають додатковим умовам формули (А.4):

$$r/t \leq 150 \text{ і } \omega t/r \leq 6 \text{ та } 500 \leq E/f_0 \leq 1000 \quad (\text{A.4})$$

Коефіцієнт C_{xb} дозволено альтернативно обчислювати за:

$$C_x = C_{x,N} \frac{\sigma_{x,N,Ed}}{\sigma_{x,Ed}} + \frac{\sigma_{x,M,Ed}}{\sigma_{x,Ed}}, \quad (\text{A.5})$$

де

$C_{x,N}$ — параметр для високих циліндрів під дією осьового стиску,

відповідно до Таблиці А.1;

$\sigma_{x,Ed}$ — розрахункове значення меридіонального напруження,
($\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,N,Ed} + \sigma_{x,M,Ed}$);

$\sigma_{x,N,Ed}$ — складова напруження від осьового стиску (рівномірна по колу складова);

$\sigma_{x,M,Ed}$ — складова напруження від загального згину труби (пікове значення змінної по колу складової).

А.3.2.3 Параметр меридіональної втрати стійкості

(1) Параметр меридіональної недосконалості рекомендовано визначати за формулою (А.6):

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + 0,6 \left(\frac{1}{Q^{0,7}} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,6}} \text{ але } \alpha_x \leq 1,00, \quad (\text{А.6})$$

де

Q — параметр допуску меридіонального стиску;

(2) параметр допуску Q рекомендовано приймати за таблицею А.3 для зазначеного класу допуску. Для допуску класу 4, параметр допуску Q залежить також від граничних умов, як визначено у таблиці 7.1.

(3) Коефіцієнт сплаву та параметр меридіональної гнучкості від граничного зминання, визначений у 8.2.3.2 рекомендовано приймати за таблицею А.4, залежно від класу втрати стійкості матеріалу, як визначено у EN 1999-1-1.

Таблиця А.3 — Параметр допуску Q для формули (А.6)

Клас допуску	Значення Q для граничних умов	
	BC1r, BC2r	BC1f, BC2f
Клас 1	16	
Клас 2	25	
Клас 3	40	
Клас 4	60	50

Таблиця А.4 — Значення $\bar{\lambda}_{x,0}$ та μ_x для меридіонального стиску

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{x,0}$	μ_x
A	0,6	0,3
B	0,65	0,35
C	0,7	0,4

(4) Для високих циліндрів, що відповідають особливим умовам А.3.2.2(4), параметр меридіональної гнучкості для граничного зминання дозволено обчислювати за формулою (А.7):

$$\bar{\lambda}_{x,0,l} = \bar{\lambda}_{x,0} + 0,10 \frac{\sigma_{x,M,Ed}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (\text{А. 7})$$

де $\bar{\lambda}_{x,0}$ рекомендовано приймати за таблицею А.4 і $\sigma_{x,Ed}$ та $\sigma_{x,M,Ed}$ такі, як наведено у А.3.2.2(4).

А.3.3 Кільцевий стиск (обруч)

А.3.3.1 Загальні положення

Циліндри дозволено не перевіряти на кільцеву втрату стійкості, якщо задовольняється формула (А.8):

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_0}} \quad (\text{А. 8})$$

А.3.3.2 Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості

(1) Наступні формули можна застосовувати для оболонок з усіма типами граничних умов.

(2) Довжину сегмента оболонки рекомендовано виражати через безрозмірний параметр ω з формули (А.9):

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (\text{А. 9})$$

(3) Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості, із застосуванням значень C_θ за таблицею А.5 для циліндрів середньої висоти і за таблицею А.6 для низьких циліндрів, рекомендовано обчислювати за формулою (А.10):

$$\sigma_{\theta,cr} = 0,92EC_{\theta}t/\omega r \quad (A.10)$$

Таблиця А.5 — Коефіцієнт втрати стійкості при зовнішньому тиску C_{θ} для формули (А.10) у циліндрах середньої висоти ($20 < \omega/C_{\theta} < 1,63 r/t$)

Варіант	Край циліндра	Граничні умови	Коефіцієнт C_{θ}
1	край 1 край 2	BC 1 BC 1	1,5
2	край 1 край 2	BC 1 BC 2	1,25
3	край 1 край 2	BC 2 BC 2	1,0
4	край 1 край 2	BC 1 BC 3	0,6
5	край 1 край 2	BC 2 BC 3	0
6	край 1 край 2	BC 3 BC 3	0
Примітка. BC 1 охоплює як BC1f так і BC1r, див. таблицю 7.1.			

Таблиця А.6 — Коефіцієнт втрати стійкості при зовнішньому тиску C_{θ} у формулі (А.10) для низьких циліндрів ($\omega/C_{\theta} \leq 20$)

Варіант	Край циліндра	Граничні умови	Коефіцієнт C_{θ}
1	край 1 край 2	BC 1 BC 1	$C_{\theta} = 1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	край 1 край 2	BC 1 BC 2	$C_{\theta} = 1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	край 1 край 2	BC 2 BC 2	$C_{\theta} = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	край 1 край 2	BC 1 BC 3	$C_{\theta} = 0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
Примітка. BC 1 охоплює як BC1f так і BC1r, див. таблицю 7.1.			

(4) Для високих циліндрів ($\omega/C_{\theta} \geq 1,63r/t$) кільцеві напруження при втраті стійкості рекомендовано обчислювати за формулою (А.11):

$$\sigma_{\theta,cr} = E \left(\frac{t}{r} \right)^2 \left[0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta}}{\omega} \cdot \frac{r}{t} \right)^4 \right] \quad (A.11)$$

А.3.3.3 Розміри зони термічного впливу

(1) Параметр кільцевої недосконалості рекомендовано визначати за

формулою (A.12):

$$\alpha_{\theta} = \alpha_{\theta, \text{ref}} + (1 - \alpha_{\theta, \text{ref}}) e^{-0,003(r/t)^{1,5} \cdot L/r} \text{ але } \alpha_{\theta} \leq 1,00 \quad (\text{A.12})$$

(2) Коефіцієнт відносної кільцевої недосконалості $\alpha_{\theta, \text{ref}}$, рекомендовано приймати за таблицею A.7 для конкретного класу допуску.

Таблиця A.7 — Коефіцієнт $\alpha_{\theta, \text{ref}}$ у формулі (A.12) залежно від класу допуску

Клас допусків	Коефіцієнт $\alpha_{\theta, \text{ref}}$
Клас 1	0,50
Клас 2	0,65
Клас 3 та 4	0,75

(3) Коефіцієнт сплаву і параметр кільцевої гнучкості для граничного зминання, визначені у 8.2.3.2 рекомендовано приймати за таблицею A.8 залежно від класу втрати стійкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

Таблиця A.8 — Значення $\bar{\lambda}_{\theta, 0}$ та μ_{θ} для кільцевого стиску

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{\theta, 0}$	μ_{θ}
A	0,4	0,3
B	0,45	0,35
C	0,5	0,4

(4) Нерівномірний розподіл тиску q_{eq} , обумовлений зовнішнім вітровим навантаженням на циліндри (див. Рисунок A.2) дозволено, для розрахунку втрати стійкості оболонки, замінити еквівалентним рівномірним зовнішнім тиском за формулою (A.13):

$$q_{\text{eq}} = k_w q_{w, \text{max}} \quad (\text{A.13})$$

де $q_{w, \text{max}}$ — максимальний вітровий тиск, а k_w рекомендовано обчислювати за формулою (A.14):

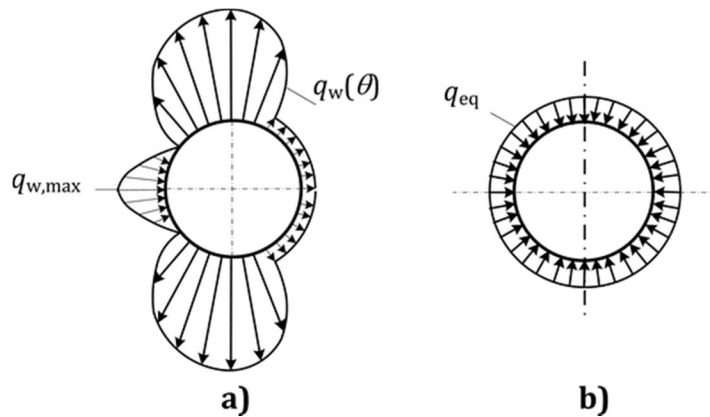
$$k_w = 0,46 \left(1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_{\theta} r}{\omega t}} \right) \quad (\text{A.14})$$

із значенням k_w , що знаходиться в межах $0,65 \leq k_w \leq 1,0$ і C_{θ} за таблицею A.5 відповідно до граничних умов.

(5) Розрахункове кільцеве напруження, введене в 8.2.3.3, визначають за формулою (A.15):

$$\sigma_{\theta,Ed} = (q_{eq} + q_s) \frac{r}{t} \quad (A.15)$$

де q_s — внутрішнє всмоктування, спричинене дією вентиляції, внутрішнім частковим вакуумом або іншим явищем.



Умовні позначки:

- a) розподіл вітрового тиску навколо оболонки;
- b) розподіл еквівалентного осесиметричного тиску.

Рисунок А.2 — Перетворення типового розподілу зовнішнього вітрового тиску

А.3.4 Зсув

А.3.4.1 Загальні положення

Циліндри дозволено не перевіряти на зсувну втрату стійкості, якщо задовільняється формула (А.16):

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left(\frac{E}{f_0} \right)^{0,67} \quad (A.16)$$

А.3.4.2 Критичні зсувні напруження при втраті стійкості

(1) Наступні формули дозволено застосовувати тільки для оболонок з граничними умовами ВС 1 або ВС 2 на обох краях.

(2) Довжину сегмента оболонки рекомендовано виражати через безрозмірний параметр ω , заданий формулою (А.17):

$$\omega = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (\text{A.17})$$

(3) Критичні зсувні напруження при втраті стійкості із застосуванням значень σ_t за таблицею А.9 рекомендовано обчислювати за формулою (А.18):

$$\tau_{cr} = 0,75 E C_\tau \sqrt{\frac{1}{\omega} \frac{t}{r}} \quad (\text{A.18})$$

Таблиця А.9 — Коефіцієнт C_τ у формулі (А.18) для критичних зсувних напружень при втраті стійкості

Циліндричні оболонки	$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}$	Коефіцієнт C_τ
Низькі	$\omega \leq 10$	$C_\tau = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}}$
Середньої висоти	$10 < \omega < 8,7r/t$	$C_\tau = 1$
Високі	$\omega \geq 8,7r/t$	$C_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\omega t}{r}}$

А.3.4.3 Параметри зсувної втрати стійкості

(1) Коефіцієнт зсувної недосконалості рекомендовано визначати за формулою (А.19):

$$\alpha_\tau = \alpha_{\tau,ref} + (1 - \alpha_{\tau,ref}) e^{-0,002r/t} \text{ але } \alpha_\tau \leq 1,00 \quad (\text{A.19})$$

(2) Коефіцієнт зсувної недосконалості $\alpha_{\tau,ref}$, рекомендовано приймати за таблицею А.10 для конкретного класу допуску.

Таблиця А.10 — Коефіцієнт $\alpha_{\tau,ref}$ у формулі (А.19) залежно від допусків

Клас допусків	Коефіцієнт $\alpha_{\tau,ref}$
Клас 1	0,50
Клас 2	0,65
Клас 3 та 4	0,75

(3) Коефіцієнт сплаву і параметр кільцевої гнучкості для граничного зминання, визначені у 8.2.3.2 рекомендовано приймати за таблицею А.11

залежно від класу втрати стійкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

Таблиця А.11 — Значення $\bar{\lambda}_{\tau,0}$ і μ_{τ} для зсуву

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{\tau,0}$	μ_{τ}
A	0,5	0,4
B	0,55	0,35
C	0,6	0,3

А.3.5 Меридіональний (осьовий) стиск з одночасним внутрішнім тиском

А.3.5.1 Критичне меридіональне напруження при втраті стійкості під дією тиску

Критичне меридіональне напруження при втраті стійкості $\sigma_{x,cr}$ може бути прийняте без урахування внутрішнього тиску, а може бути обчислене відповідно до А.3.2.2.

А.3.5.2 Параметри меридіональної втрати стійкості під тиском

(1) Міцність на меридіональну втрату стійкості під тиском рекомендовано перевіряти аналогічно до міцності на меридіональну втрату стійкості без тиску, як зазначено в 8.2.3.3 та А.3.2.3. Однак, коефіцієнт недосконалості для випадку без тиску α_x , дозволено замінити на коефіцієнт недосконалості для випадку з тиском $\alpha_{x,p}$, заданий формулами (А.20) — (А.23):

$$\alpha_{x,p} = \left(1 - \left(\frac{\sigma_{eq} \gamma_{M1}}{f_0} \right)^{n_p} \right) \alpha_{x,pe} , \quad (A. 20)$$

де

$$\alpha_{x,pe} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \frac{\bar{p}}{\bar{p} + 0,3/\sqrt{\alpha_x}} \quad (A. 21)$$

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{x,cr}} \quad (A. 22)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x \sigma_\theta} \quad (A.23)$$

p — менше зі значень місцевого внутрішнього тиску в розгляданій точці, що гарантовано співіснує сумісно із меридіональним стиском;

α_x — коефіцієнт меридіональної недосконалості без урахування тиску відповідно до А.3.2.3;

$\sigma_{x,cr}$ — пружне критичне меридіональне напруження при втраті стійкості відповідно до А.3.2.2(3);

n_p — параметр Рамберга-Осгуда, наведений в таблиці 5.3 або 5.4 EN 1999-1-1:2023.

(2) Коефіцієнт $\alpha_{x,pe}$ рекомендовано приймати рівним 1,0 для високих циліндрів, згідно А.3.2.2(3), таблиця А.1. Крім того, $\alpha_{x,pe}$ рекомендовано приймати рівним 1,0 крім випадків, якщо:

- циліндр має середню висоту, відповідно до А.3.2.2(3), таблиці А.1;
- циліндр низький, відповідно до А.3.2.2(3), таблиця А.1 та у А.3.2.2(3) було прийнято $C_x = 1$.

А.3.6 Комбінації меридіонального (осьового) стиску, кільцевого стиску (обруч) та зсуву

(1) Параметри взаємодії втрати стійкості для використання в 8.2.3.3(3) дозволено обчислити за формулами (А.24) і (А.25):

$$\begin{aligned} k_x &= 1,25 + 0,75\chi_x \\ k_\theta &= 1,25 + 0,75\chi_\theta \end{aligned} \quad (A.24)$$

$$\begin{aligned} k_\tau &= 1,75 + 0,25\chi_\tau \\ k_i &= (\chi_x \chi_\theta)^2 \end{aligned} \quad (A.25)$$

де χ_x , χ_θ і χ_τ — понижувальні коефіцієнти для втрати стійкості,

визначені у 8.2.3.2, з використанням параметрів втрати стійкості, наведених у А.3.2 — А.3.4.

(2) Рекомендовано приймати, що три складові мембранного напруження взаємодіють у комбінаціях в усіх точках оболонки за винятком точок, що прилягають до границь. Перевіркою на сумісну дію при втраті стійкості можна знехтувати для всіх точок, що розташовані в межах довжини граничної зони l_s , яка прилягає до будь-якої грані циліндричного сегмента. Значення l_s є меншим із значень, заданих формулою (А.26):

$$l_s = 0,1l \text{ і } l_s = 0,16r\sqrt{r/t} \quad (\text{А. 26})$$

(3) Якщо максимальне значення будь-якого пов'язаного із втратою стійкості мембранного напруження у циліндричній оболонці, виникає в межах граничної зони довжиною l_s , що прилягає до будь-якого краю циліндра, перевірку сумісної дії відповідно до 8.2.3.3(3) дозволено виконувати з використанням значень будь-яких пов'язаних із втратою стійкості мембранних напружень поза вільною довжиною l_f за межами граничних зон, див. рисунок А.3 а, де l_f задано формулою (А.27):

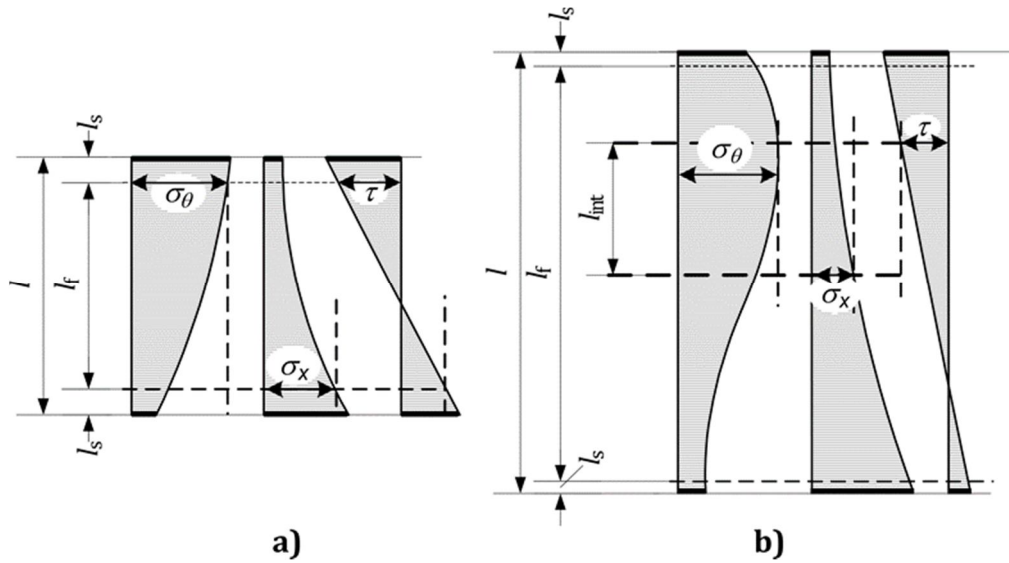
$$l_f = l - 2l_s \quad (\text{А. 27})$$

(4) Для високих циліндрів, як вказано у А.3.2.2(3), таблиця А.1, напруження, які вважають приналежними до груп спільної дії, дозволено обмежувати до будь-якого відрізка довжини l_{int} , розміщеного у межах вільної довжини, що лишилася, l_f , для перевірки спільної дії (див. рисунок А.3b), де l_{int} задано формулою (А.28):

$$l_{\text{int}} = 1,3r\sqrt{r/t} \quad (\text{А. 28})$$

(5) Якщо у вищезазначених параграфах (3) або (4) не передбачено конкретні положення для визначення відносного розташування або поділу груп складових мембранного напруження, пов'язаних з взаємодією, максимальне значення кожного мембранного напруження, незалежно від його розташування в оболонці, може бути консервативно використано у

формулі (8.24).



Умовні позначки:

a) — низький циліндр

b) — високий циліндр

Рисунок А.3 — Приклади пов'язаних із взаємодією груп складових мембранних напружень

А.4 Непідкріплені циліндричні оболонки зі ступінчастою товщиною стінки

А.4.1 Загальні положення

А.4.1.1 Позначки та граничні умови

(1) У цьому розділі застосовано наступні позначки:

l — загальна довжина циліндра між кінцями;

r — радіус серединної поверхні циліндра;

j — показник окремих секцій циліндра з постійною товщиною стінки (для $j = 1$ до n);

t_j — постійна товщина стінки секції j циліндра;

l_j — довжина секції j циліндра.

(2) Наступні вирази рекомендовано застосовувати тільки для оболонок із граничними умовами BC 1 та BC 2 на обох краях (див. 7.2), без розрізнення між ними.

A.4.1.2 Геометрія і зміщення вузлів

(1) Якщо товщина стінки циліндра поступово ступінчасто збільшується зверху до низу (див. рисунок A.4(a)), дозволено застосовувати методику, наведену в цьому розділі. В якості альтернативного підходу, для визначення критичного кільцевого напруження при втраті стійкості $\sigma_{\theta,cr,eff}$, дозволено застосовувати лінійно-пружний розрахунок біфуркації (LBA), див. A.4.3.1(7).

(2) Передбачені зміщення e_0 між пластинами суміжних секцій (див. рисунок A.5) дозволено розглядати як прогнозовані наступними формулами за умови, що передбачене значення e_0 менше допустимого значення $e_{0,p}$, яке рекомендовано приймати як менше із заданих формулою (A.29):

$$e_{0,p} = 0,5(t_{\max} - t_{\min}) \text{ і } e_{0,p} = 0,5t_{\min}, \quad (\text{A. 29})$$

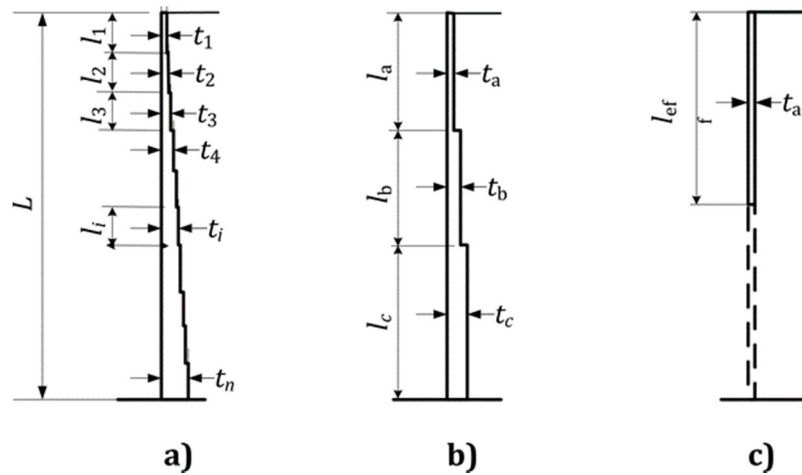
де

$t_{\max}$ — товщина товстішої стінки вузла;

$t_{\min}$ — товщина тоншої стінки вузла.

(3) Для циліндрів із допустимими прогнозованими зміщеннями між пластинами суміжних секцій відповідно до (2), радіус r , рекомендовано приймати як середнє значення всіх секцій.

(4) Для циліндрів зі з'єднаннями внапусток (вузол внапусток) рекомендовано застосовувати положення, наведені в A.5.



Умовні позначки:

- a) — Циліндр із ступінчасто змінною товщиною стінки
- b) — Еквівалентний циліндр, складений з трьох секцій
- c) — Еквівалентний окремий циліндр з рівномірною товщиною стінок

Рисунок А.4 — Перетворення ступінчастого циліндра в еквівалентний циліндр

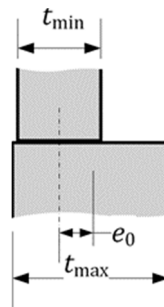


Рисунок А.5 — Передбачене зміщення e_0 , в оболонці, яка з'єднана ВСТИК

А.4.2 Меридіональний (осьовий) тиск

(1) Кожну секцію циліндра j , довжиною l_j рекомендовано розглядати як еквівалентний циліндр із загальною довжиною $l = L$, і з постійною товщиною стінки $t = t_j$ відповідно до А.3.2.

(2) Для довгих еквівалентних циліндрів, визначених у А.3.2.2(3) таблиця А.1, параметр C_{xb} рекомендовано консервативно прийняти як $C_{xb} = 1$, якщо краще значення не визначено більш детальним розрахунком

А.4.3 Кільцевий тиск (обруч)

A.4.3.1 Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості

(1) Якщо циліндр складено із трьох секцій з різними товщинами стінок, рекомендовано застосовувати методику, описану в (4) — (7), див. рисунок A.4(b).

(2) Якщо циліндр складено тільки із однієї секції (тобто він має постійну товщину стінки) рекомендовано застосовувати A.3.

(3) Якщо циліндр складено із двох секцій з різною товщиною стінок, методику, описану в (4) — (7) рекомендовано застосовувати, розглядаючи дві із трьох фіктивних секцій, a та b , як такі, що мають однакову товщину.

(4) Якщо циліндр складено більше ніж із трьох секцій із різною товщиною стінок (див. рисунок A.4(a)), то спочатку його рекомендовано замінити еквівалентним циліндром, до якого входять три секції a , b та c (див. рисунок A.4(b)). Довжину верхньої секції l_a рекомендовано продовжувати до верхнього краю першої секції, товщина якої в 1,5 разів більша, ніж найменша товщина стінки t_j , але не більше половини загальної довжини циліндра, L циліндра. Довжину двох інших секцій l_b і l_c , рекомендовано приймати як наведено у формулах (A.30) і (A.31):

$$l_b = l_a \text{ і } l_c = L - 2l_a, \text{ якщо } l_a \leq L/3 \quad (\text{A.30})$$

$$l_b = l_c = 0,5(L - l_a), \text{ якщо } L/3 < l_a \leq L/2 \quad (\text{A.31})$$

(5) Фіктивні товщини стінок t_a , t_b і t_c трьох секцій рекомендовано визначати як середньозважене значення товщини стінок по кожній із трьох фіктивних секцій, заданих формулами (A.32) — (A.34):

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j t_j \quad (\text{A.32})$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j t_j \quad (\text{A.33})$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j t_j \quad (\text{A.34})$$

(6) Трисекційний циліндр (тобто еквівалентний або реальний циліндр)

рекомендовано заміняти еквівалентним простим циліндром із ефективною довжиною $t = t_a$, (див. рисунок А.4(с)) і з однаковою товщиною стінок, визначеною за формулою (А.35):

$$l_{\text{eff}} = l_a / \kappa \quad (\text{А. 35})$$

де κ — безрозмірний коефіцієнт, отриманий з Рисунка А.6.

(7) Для секцій циліндра середньої висоти або низьких критичні кільцеві напруження при втраті стійкості кожної секції циліндра j вихідного циліндра із ступінчасто змінною товщиною стінки рекомендовано визначати за формулою (А.36):

$$\sigma_{\theta, \text{cr}, j} = (t_a / t_j) \sigma_{\theta, \text{cr}, \text{eff}} \quad (\text{А. 36})$$

де $\sigma_{\theta, \text{cr}, \text{eff}}$ — критичне кільцеве напруження при втраті стійкості, отримане відповідно з А.3.3.2(3) або А.3.3.2(4), для еквівалентного одиничного циліндра завдовжки l_{eff} відповідно до параграфу (6). Коефіцієнт C_θ у цих формулах рекомендовано приймати $C_\theta = 1,0$.

(8) Довжину сегменту оболонки рекомендовано виражати через параметр безрозмірної величини ω_j , заданий формулою (А.37):

$$\omega_j = \frac{l_j}{r} \sqrt{\frac{r}{t_j}} = \frac{l_j}{\sqrt{r t_j}} \quad (\text{А. 37})$$

(9) Якщо секція циліндра j висока, рекомендовано провести другу додаткову оцінку напруження при втраті стійкості із застосуванням меншого із двох значень, отриманих із параграфів (7) та (10) для розрахунку на втрату стійкості.

(10) Секцію циліндра j рекомендовано вважати високою якщо виконано умову формули (А.38):

$$\omega_j \geq 1,63 \frac{r}{t_j} \quad (\text{А. 38})$$

у такому випадку критичне кільцеве напруження втрати стійкості рекомендовано визначати за формулою (А.39):

$$\sigma_{\theta,cr,j} = E \left(\frac{t_j}{r} \right)^2 \left(0,275 + 2,03 \left(\frac{C_{\theta} r}{\omega_j t_j} \right)^4 \right) \quad (A.39)$$

де C_{θ} рекомендовано приймати за таблицею А.5 або А.6 в залежності від висоти секції циліндра j .

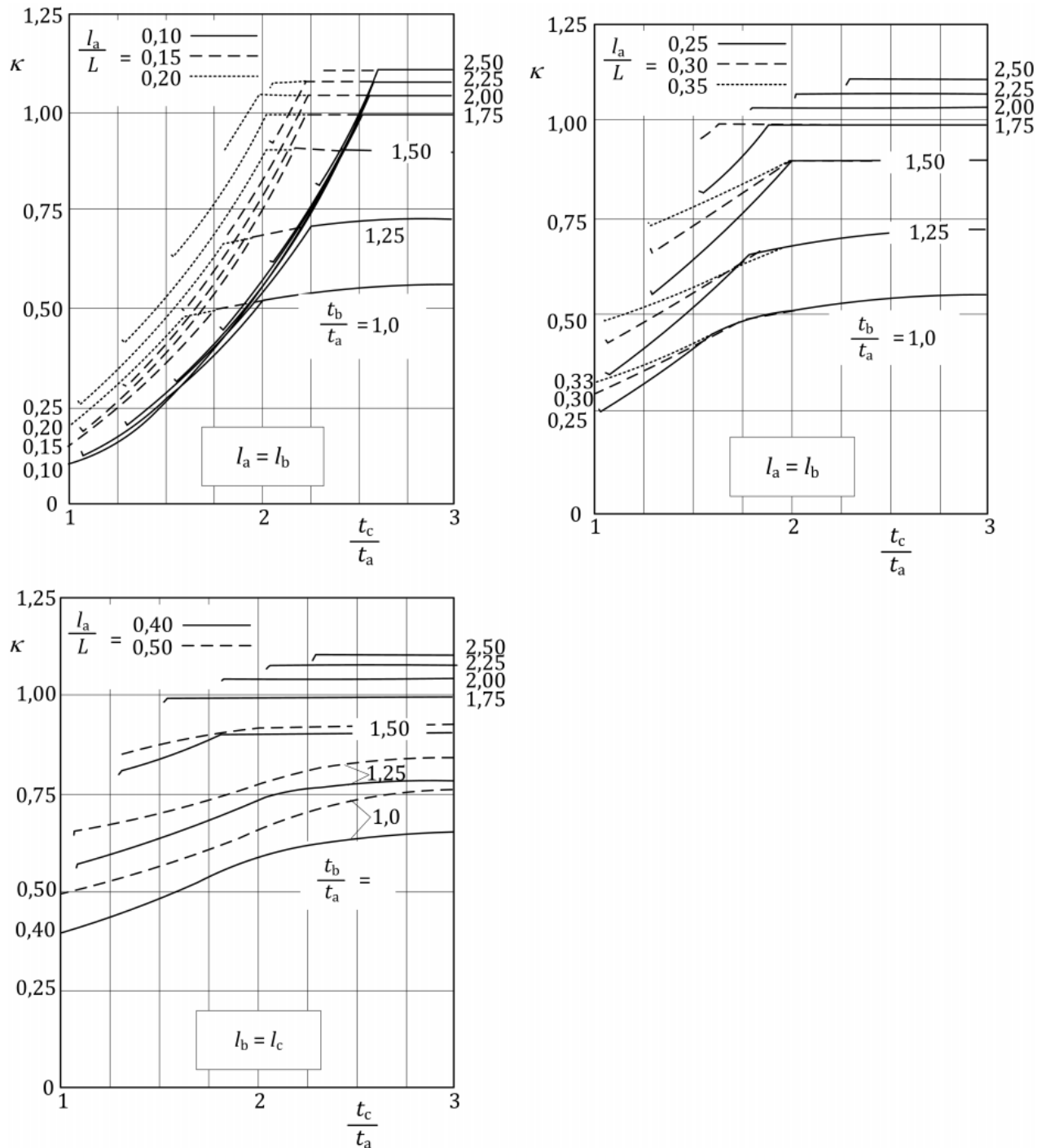


Рисунок А.6 — Коефіцієнт κ для визначення ефективної довжини l_{eff}

А.4.3.2 Перевірка міцності при втраті стійкості для кільцевого стиску

(1) Для кожної секції циліндра j має бути виконано умови 8.2.3 і проведено перевірку за формулою (A.40) :

$$\sigma_{\theta,Ed,j} \leq \sigma_{\theta,Rd,j} , \quad (A.40)$$

де

$\sigma_{\theta,Rd,j}$ — визначальне значення мембранного кільцевого стискального напруження, як описано в наступних параграфах;

$\sigma_{\theta,Ed,j}$ — розрахункове кільцеве напруження при втраті стійкості, отримане із критичного кільцевого напруження при втраті стійкості відповідно до А.3.3.3.

(2) Якщо розрахункове значення результуючого кільцевого напруження $n_{\theta,Ed}$ є постійним по всій довжині L , визначальне значення стискального мембранного кільцевого напруження в секції j рекомендовано приймати за формулою (A.41):

$$\sigma_{\theta,Ed,j} = n_{\theta,Ed} / t_j \quad (A.41)$$

(3) Якщо $n_{\theta,Ed}$ змінне на довжині L , то визначальне значення стискального мембранного кільцевого напруження рекомендовано приймати як фіктивне значення $\sigma_{\theta,Ed,j,mod}$, визначене із максимального значення результуючого кільцевого напруження $n_{\theta,Ed}$, в межах L поділене на місцеву товщину t_j , як задано формулою (A.42) (див. рисунок А.7):

$$\sigma_{\theta,Ed,j,mod} = \max(n_{\theta,Ed}) / t_j \quad (A.42)$$

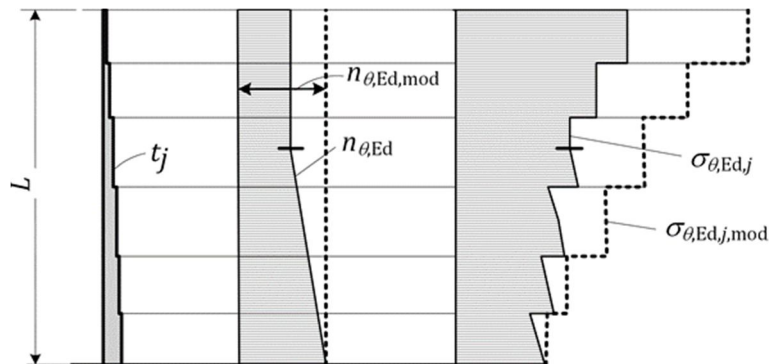


Рисунок А.7 — Визначальні значення кільцевих стискальних мембранних напружень для випадків, коли $n_{\theta,Ed}$, змінне по довжині L

A.4.4 Зсув

A.4.4.1 Критичні зсувні напруження при втраті стійкості

(1) Якщо немає спеціального правила для оцінки еквівалентного одиничного циліндра з рівномірною товщиною стінки, можна застосовувати формули A.4.3.1(1) — (6).

(2) Подальше визначення критичних зсувних напружень при втраті стійкості дозволено виконувати за A.4.3.1(7) — (10), але із заміною формули із A.3.3.2 для кільцевого стиску відповідним виразом для зсуву з A.3.4.2.

A.4.4.2 Перевірка міцності при втраті стійкості для зсуву

Правила, наведені в A.4.3.2 дозволено застосовувати за умови заміни формули для кільцевого стиску відповідним виразом для зсуву.

A.5 Непідсилені циліндричні оболонки, з'єднані внапусток

A.5.1 Геометрія та результуючі напруження

(1) Якщо циліндрична оболонка виготовлена із застосуванням з'єднань внапусток, (див. рисунок A.8), замість наведених у A.4 дозволено застосовувати наступні положення.

(2) Ці положення застосовують як до з'єднань внапусток, що збільшують радіус серединної поверхні оболонки, так і до тих, що його зменшують. Якщо з'єднання внапусток проходить у кільцевому напрямку навколо осі оболонки (кільцеве з'єднання внапусток), для визначення меридіонального стиску рекомендовано застосовувати положення A.5.2. Якщо багато з'єднань внапусток проходять у кільцевому напрямку навколо осі оболонки зі зміною товщини пластини вниз по оболонці, для визначення кільцевого стиску рекомендовано застосовувати положення A.5.3. Якщо окреме з'єднання внапусток проходить паралельно осі оболонки (меридіональне з'єднання внапусток), для визначення кільцевого стиску

рекомендовано застосовувати положення А.5.3. В інших випадках особливий підхід до визначення впливу з'єднання внапусток на опір втраті стійкості не потрібний.

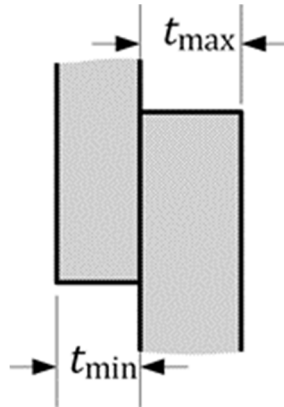


Рисунок А.8 — Оболонка, з'єднана внапусток

А.5.2 Меридіональний (осьовий) стиск

(1) Якщо на циліндр, з'єднаний внапусток меридіональними з'єднаннями внапусток, діє меридіональний стиск, то опір втраті стійкості дозволено обчислювати як для циліндра з рівномірною або зі ступінчасто змінною товщиною стінки відповідно, але із домноженням розрахункового опору на 0,70.

(2) Якщо в місці з'єднання внапусток відбувається зміна товщини пластини, значення розрахункового опору втраті стійкості дозволено приймати як для тоншої пластини, як визначено в параграфі (1).

А.5.3 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Якщо на циліндр, з'єднаний внапусток, діє кільцевий стиск уперек меридіональних з'єднань внапусток, розрахунковий опір втраті стійкості дозволено обчислювати як для циліндра з рівномірною або зі ступінчасто змінною товщиною стінки відповідно, але з застосуванням понижувального коефіцієнта 0,90.

(2) Якщо на циліндр, з'єднаний внапусток у кільцевому напрямку багатьма кільцевими з'єднаннями внапусток зі зміною по висоті товщини

стілки оболонки, діє кільцевий стиск, рекомендовано застосовувати методику А.2, без геометричних обмежень на ексцентриситет з'єднання, а розрахунковий опір втраті стійкості — домножувати на 0,90.

(3) Якщо застосовано з'єднання внапусток в обох напрямках зі ступінчастим розміщенням меридіональних з'єднань внапусток у почергових смугах або рядах, розрахунковий опір втраті стійкості рекомендовано прийняти як менший з отриманих за параграфом (1) або (2). Застосування понижувального коефіцієнта не потрібно.

A.5.4 Зсув

(1) Якщо на циліндр, з'єднаний внапусток, діє мембранний зсув, опір втраті стійкості дозволено обчислювати як для циліндра з рівномірною або зі ступінчасто змінною товщиною стінки відповідно.

A.6 Непідкріплені конічні оболонки

A.6.1 Загальні положення

A.6.1.1 Познаки

У цьому розділі застосовано наступні познаки:

h — осьова довжина (висота) зрізаного конуса;

L — меридіональна довжина зрізаного конуса;

r — радіус серединної поверхні конуса, перпендикулярний до осі обертання, що змінюється лінійно вниз по довжині;

r_1 — радіус зрізаного кінця конуса;

r_2 — радіус основи конуса;

β — половина кута вершини конуса.

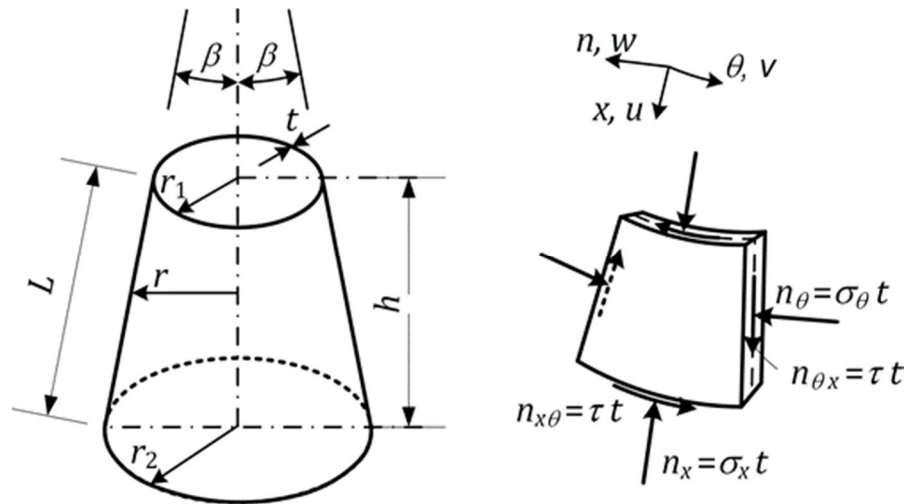


Рисунок А.9 — Геометричні характеристики конуса, мембранні та результуючі напруження

А.6.1.2 Граничні умови

(1) Наступні формули рекомендовано застосовувати тільки для оболонок із граничними умовами ВС 1 та ВС 2 на обох краях (див. 7.2 та 8.2), без розрізнення між ними. Ці вирази не рекомендовано застосовувати для оболонки, в якій будь-яка гранична умова належить до типу ВС 3.

(2) Правила, наведені у А.6.1, рекомендовано застосовувати тільки для наступних двох обмежувальних граничних умов радіального зміщення будь-якого кінця конуса:

- «умова циліндра» $w = 0$;
- «умова кільця» $u \sin \beta + w \cos \beta = 0$

А.6.1.3 Геометричні характеристики

(1) Наступні правила справедливі тільки для зрізаних конусів із постійною товщиною стінки і половиною кута при вершині конуса $\beta \leq 65^\circ$ (див. рисунок А.9).

А.6.2 Розрахункові напруження при втраті стійкості

А.6.2.1 Еквівалентний циліндр

(1) Розрахункові напруження при втраті стійкості, що необхідні для перевірки міцності при втраті стійкості відповідно до 8.2.3 дозволено знайти за допомогою еквівалентного циліндра висотою l_e і радіусом r_e , залежно від типу напруження, згідно з таблицею А.12.

Таблиця А.12 — Висота та радіус еквівалентного циліндра

Навантаження	Еквівалентна довжина	Радіус еквівалентного циліндра
Меридіональний стиск	$l_e = L$	$r_e = \frac{r}{\cos\beta}$
Кільцевий стиск (обруч)	$l_e = L$	$r_e = \frac{r_1 + r_2}{2\cos\beta}$
Рівномірний зовнішній тиск q Граничні умови: або ВС 1 на обох кінцях, або ВС 2 на обох кінцях	l_e менше значення з $l_{e1} = L$ та $l_{e2} = \frac{r_2(0,53 + 0,125\beta)}{\sin\beta}$ (β у радіанах, див. рисунок А.9)	$r_e = \frac{0,55r_1 + 0,45r_2}{\cos\beta}$, (нижчі конуси) якщо $l_e = l_{e1}$
		$r_e = 0,71r_2 \frac{1 - 0,1\beta}{\cos\beta}$, (вищі конуси) якщо $l_e = l_{e2}$
Зсув	$l_e = L$	$r_e = \left(1 + \rho - \frac{1}{\rho}\right)r_1\cos\beta$, де $\rho = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{2r_1}}$
Рівномірне кручення	$l_e = L$	$r_e = \frac{r_1 + r_2}{2\cos\beta} (1 - \rho^{2,5})^{0,4}$, де $\rho = \frac{L \sin\beta}{r_2}$

(2) Для конусів, на які діє рівномірний зовнішній тиск q , перевірку міцності на втрату стійкості рекомендовано виконувати на основі мембранного напруження за формулою: (А.43):

$$\sigma_{\theta,Ed} = qr_e/t \quad (\text{А. 43})$$

А.6.3 Перевірка міцності при втраті стійкості

А.6.3.1 Меридіональний стиск

(1) Розрахункову перевірку стійкості рекомендовано проводити в точці конуса з найбільш критичною комбінацією розрахункового меридіонального напруження і розрахункового напруження при втраті стійкості, відповідно до А.3.2.2.

(2) Якщо меридіональний стиск спричинено постійним осьовим

зусиллям на зрізаний конус, то і радіус зрізаного кінця r_1 і радіус основи r_2 рекомендовано приймати як можливе місцерозташування найбільш критичних точок.

(3) Якщо меридіональний стиск від постійного згинального моменту діє на усічений конус, радіус зрізаного кінця r_1 , рекомендовано приймати як найбільш критичний.

(4) Розрахункове напруження при втраті стійкості, рекомендовано визначати для еквівалентного циліндра відповідно до А.3.2.

А.6.3.2 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Якщо кільцевий стиск спричинено рівномірним зовнішнім тиском, розрахункову перевірку стійкості рекомендовано проводити на основі кільцевого мембранного напруження $\sigma_{\theta,Ed,env}$ визначеного за формулою (А.43).

(2) Якщо кільцевий стиск викликано діями, відмінними від рівномірного зовнішнього тиску, розрахунковий розподіл напружень $\sigma_{\theta,Ed(x)}$ рекомендовано замінити розподілом напружень $\sigma_{\theta,Ed,env(x)}$, що в кожній точці перевищує обчислене значення, але виникає від фіктивного рівномірного зовнішнього тиску. Тоді розрахункову перевірку стійкості рекомендовано виконувати за параграфом (1), але із застосуванням $\sigma_{\theta,Ed,env}$ замість $\sigma_{\theta,Ed}$.

(3) Розрахункове напруження при втраті стійкості рекомендовано визначати для еквівалентного циліндра відповідно до А.3.3.

А.6.3.3 Зсув і рівномірне кручення

(1) Якщо зсув виникає від постійного загального кручення конуса, розрахункову перевірку стійкості рекомендовано проводити використовуючи діюче розрахункове зсувне напруження τ_{Ed} , у точці з $r = r_e \cos \beta$.

(2) Якщо зсув виникає не від загального постійного крутного моменту

(як, наприклад, від загального зсувного навантаження на конус) розрахунковий розподіл напружень $\tau_{Ed}(x)$, рекомендовано замінити фіктивним розподілом напружень $\tau_{Ed,env}(x)$, що в кожній точці перевищує розрахункове значення, але виникає від фіктивного загального крутного моменту. Розрахункову перевірку стійкості рекомендовано проводити згідно з параграфом (1), але із застосуванням $\tau_{Ed,env}$ замість τ_{Ed} .

(3) Розрахункове напруження при втраті стійкості τ_{Rd} , рекомендовано визначати для еквівалентного циліндра відповідно до А.3.4.

А.7 Підкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки

А.7.1 Загальні положення

(1) Підкріплені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки:

- ізотропні стінки, підкріплені в меридіональному або кільцевому напрямку;
- гофровані стінки, підкріплені в меридіональному або кільцевому напрямку.

(2) В обох випадках перевірку стійкості дозволено виконувати шляхом розгляду підкріпленої стінки як еквівалентної ортотропної оболонки, згідно з А.7.6, за умови, що виконано вимоги А.7.6.

(3) Для обшивки без меридіональних елементів жорсткості, гофрованої в кільцевому напрямку, опір пластичній втраті стійкості можна обчислити за правилами, наведеними у А.7.4.2(3), (4) і (5).

(4) Якщо передбачається, що обшивка, гофрована в кільцевому напрямку, не сприймає осьове навантаження, опір втраті стійкості окремого елемента жорсткості дозволено оцінювати відповідно до А.7.4.3.

А.7.2 Ізотропні стінки з меридіональними елементами жорсткості

A.7.2.1 Загальні положення

(1) Якщо ізотропну стінку підкріплено меридіональними стрингерами, то в оцінці меридіональних стискальних напружень у стінці та елементі жорсткості рекомендовано приймати до уваги ефект вкорочення стінки під впливом внутрішнього тиску.

(2) Опір розриву меридіонального шва рекомендовано визначати як для ізотропної оболонки.

(3) Якщо конструкційне з'єднання містить елемент жорсткості, як частину системи для передавання кільцевих зусиль розтягу, вплив цих зусиль на елемент жорсткості рекомендовано враховувати під час оцінювання сил, що діють на елемент жорсткості, а також його схильності до розриву під дією кільцевого розтягу.

A.7.2.2 Меридіональний (осьовий) стиск

(1) Стінку оболонки рекомендовано розраховувати за тими ж критеріями для стиску при втраті стійкості, що і для непідкріпленої стінки, окрім випадку, коли максимальна відстань між елементами жорсткості $d_{s,max}$, (рисунок А.10) менша за $2\sqrt{rt}$,

де t — місцева товщина стінки.

(2) Якщо крок меридіональних елементів жорсткості менший за $2\sqrt{rt}$ опір втрати стійкості цілої стінки рекомендовано оцінювати за процедурою, наведеною у А.7.6.

(3) Оцінку стійкості на осьовий стиск при втраті стійкості самих елементів жорсткості рекомендовано виконувати за положеннями EN 1999-1-1 з урахуванням фактичних граничних умов для елементів жорсткості.

(4) Там де це потрібно, рекомендовано враховувати ексцентриситет між стінкою оболонки та елементом жорсткості.

A.7.2.3 Зсув

(1) Стінку оболонки рекомендовано перевірити на ті ж критерії втрати

стійкості під дією зовнішнього тиску, що й для непідкріпленої стінки, окрім випадків, коли проводиться більш грубий розрахунок.

(2) У випадку більш грубого розрахунку, меридіональні елементи жорсткості дозволено «розмазати», щоб отримати відповідну ортотропну стінку. Тоді оцінку напружень при втраті стійкості можна проводити згідно положень А.7.6, враховуючи жорсткість розтягу $C_\varphi = C_\theta = Et$ та зсувну мембранну жорсткість $C_{\varphi\theta} = 0,38Et..$

А.7.2.4 Зсув

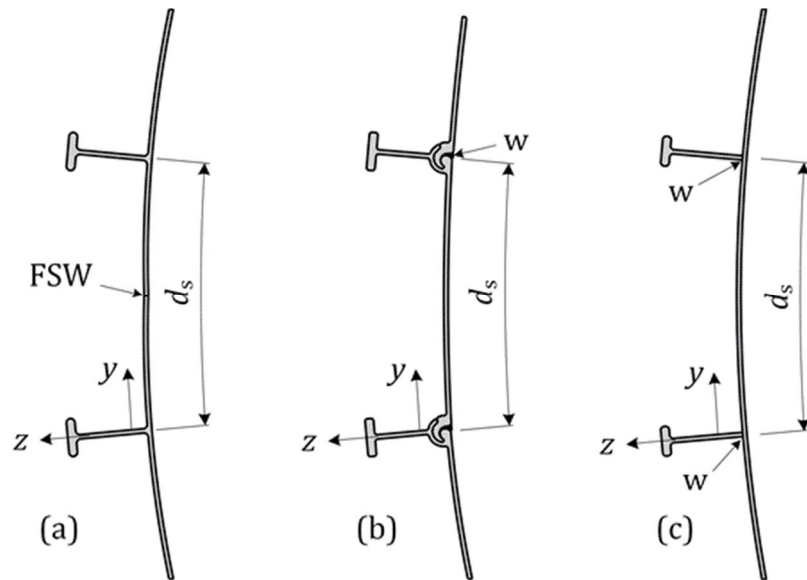
(1) Якщо більша частина стінки оболонки зазнає впливу зсуву (ексцентриситет під час монтажу, навантаження від землетрусу тощо), опір мембранному зсуву при втраті стійкості рекомендовано визначати як для ізотропної непідкріпленої стінки (див. А.5.4), але опір можна збільшити, врахувавши елементи жорсткості. Еквівалентну довжину l для оболонки під дією зсуву дозволено приймати як менше зі значень відстані між кільцями жорсткості або границями чи подвоєного кроку меридіональних елементів жорсткості, за умови, що кожен елемент має жорсткість на згин EI_y у меридіональному напрямку, (навколо кільцевої осі) більшу за значення, наведене у формулі (А.44):

$$EI_{y,\min} = 0,1Et^3\sqrt{rl} , \quad (\text{А. 44})$$

де значення l та t прийнято як для найбільш несприятливого випадку втрати стійкості.

(2) Якщо дискретний елемент жорсткості різко обривається посеред оболонки, зусилля, у елементі жорсткості рекомендовано рівномірно розподілити по оболонці на довжину, що не перевищує $4\sqrt{rt}$.

(3) За умов, описаних у параграфі (2), чи у випадку, коли елемент жорсткості передає місцеві зусилля на оболонку, прийняте значення опору передачі зсуву між елементом жорсткості та оболонкою не має перевищувати величин, наведених у А.3.4.



Умовні позначки:

w — зварний шов;

FSW — ротаційне зварювання тертям (*friction stir welding; FSW*).

Рисунок А.10 — Типові оболонки, підсилені в осьовому напрямку, виконані з (а) та (б) пресованих виробів і (с) пластин та пресованих виробів

А.7.3 Ізотропні стінки з кільцевими елементами жорсткості

Для перевірки на втрату стійкості керуються правилами, поданими у А.7.6, умовно розглядаючи підкріплену оболонку як ортотропну.

А.7.4 Гофровані у кільцевому напрямку стінки з меридіональними елементами жорсткості

А.7.4.1 Загальні положення

(1) В усіх розрахунках рекомендовано застосовувати товщину без покриттів і геометричних допусків.

(2) Мінімальна товщина гофрованих листів стінки має бути не меншою за 0,68 мм.

(3) Якщо циліндрична стінка з кільцевим гофруванням має прилеглі меридіональні елементи жорсткості, рекомендовано вважати, що така стінка не сприймає меридіональні зусилля, окрім випадку, коли її розглядають як ортотропну оболонку, див. А.7.6.

(4) Особливу увагу рекомендовано приділяти забезпеченню того, щоб елементи жорсткості мали постійну гнучкість при вигині в меридіональній площині, нормальній до стінки, оскільки це необхідно для розвитку опору втраті стійкості.

(5) Якщо стінку підкріплено меридіональними ребрами жорсткості, то закріплення обшивки до елементів жорсткості має забезпечити передачу розподілених зсувних навантажень з обшивки на елементи жорсткості. Товщину обшивки рекомендовано підбирати так, щоб запобігти розриву в місцях кріплень, зважаючи на знижену несну здатність кріпильних елементів у гофрованому листовому матеріалі.

(6) Рекомендовано виконати всі розрахунки результуючих напружень, опорів та решту перевірок, наведених у 7, 8.1 та А.3, але з урахуванням викладеного вище в параграфах (1) — (5).

Примітка. Приклад улаштування підкріплення стінки показано на рисунку А.11.

(7) Болти закріплення панелей мають задовольняти умови EN 1999-1-1. Мінімальний діаметр болта рекомендовано приймати М8.

(8) Вузол з'єднання панелей має відповідати вимогам EN 1999-1-4 для болтів під дією зсуву.

(9) Крок між кріпильними елементами по периметру кола не має перевищувати 3° окружності.

(10) Якщо в стінці є отвори під люки, двері, шнеки або інші елементи, ці зони рекомендовано місцево підсилити, застосувавши гофрований настил більшої товщини, щоб гарантувати, що концентратори напружень не призведуть до місцевого розриву.

Примітка. Типову схему болтового з'єднання панелей гофрованої оболонки показано на рисунку А.12.

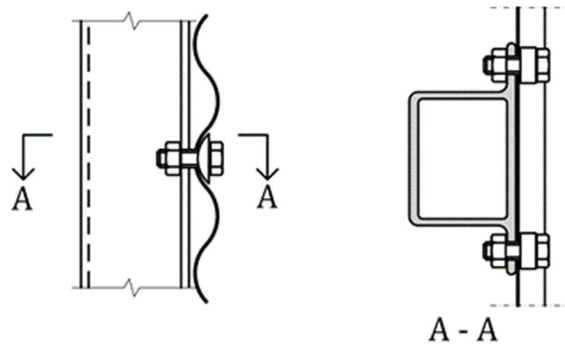


Рисунок А.11 — Приклад улаштування меридіонального підкріплення оболонок з кільцевим гофруванням

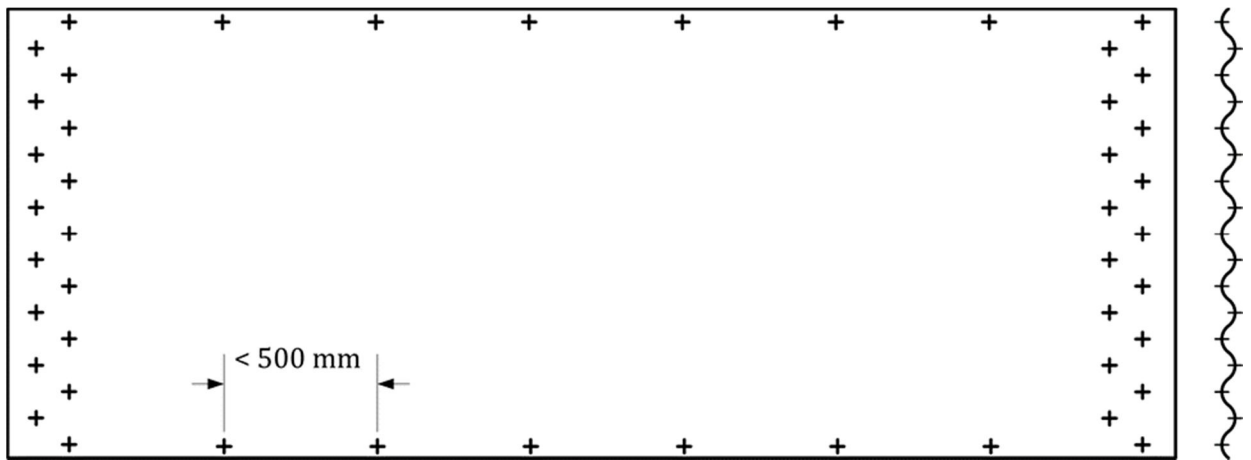


Рисунок А.12 — Типова схема болтового з'єднання панелей гофрованої оболонки

А.7.4.2 Загальні положення

(1) Розрахунковий опір осьовому стиску у кожній точці оболонки рекомендовано визначати, із застосуванням зазначеного класу допуску за виконанням, значення внутрішнього тиску p і рівномірно розподіленого кільцевого стискального напруження. При проектуванні рекомендовано враховувати кожну точку оболонки, з меридіональними змінами осьового стиску включно, за винятком випадків, передбачених цим стандартом.

(2) Розрахунок на втрату стійкості стінок з меридіональними елементами жорсткості рекомендовано проводити за одним з двох альтернативних методів:

а) розрахунок на втрату стійкості еквівалентної ортотропної оболонки

(див. А.7.6), якщо меридіональна відстань між елементами жорсткості відповідає вимогам А.7.6.1(3);

б) розрахунок на втрату стійкості окремих елементів жорсткості (за припущення, що гофрована стінка не сприймає осьові навантаження, але забезпечує додатковий опір елементам жорсткості) згідно з А.7.4.3, якщо меридіональна відстань між елементами жорсткості не відповідає вимогам А.7.6.1(3).

(3) Для гофрованої оболонки без меридіонального підкріплення, значення місцевого опору пластичній втраті стійкості (опір зминанню гофр або «сповзанню») рекомендовано приймати як більше зі значень, обчислених за формулами (А.45) та (А.46):

$$n_{x,Rk} = t^2 f_o / 2d \quad (\text{А. 45})$$

та

$$n_{x,Rk} = r_\phi t f_o / r, \quad (\text{А. 46})$$

де

t — товщина листа;

d — відстань між верхньою точкою гребеня і найнижчою точкою низом западини;

r_ϕ — місцева кривизна гофрування (див. Рисунок А.14);

r — радіус циліндра.

Значення місцевого опору пластичній втраті стійкості $n_{x,Rk}$ рекомендовано приймати незалежно від величини внутрішнього тиску p_n .

(4) Розрахункове значення місцевого опору пластичній втраті стійкості рекомендовано визначати за формулою (А.47):

$$n_{x,Rd} = \alpha_x n_{x,Rk} / \gamma_{M1}, \quad (\text{А. 47})$$

де $\alpha_x = 0,80$. For γ_{M1} , див. 4.1.

(5) В кожній точці конструкції розрахункові напруження мають задовольняти формулу (А.48):

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \quad (A.48)$$

A.7.4.3 Підкріплені стінки, в яких осьовий стиск сприймають виключно елементи жорсткості

(1) Якщо прийнято, що гофрована обшивка не сприймає осьові навантаження (метод (b) за A.7.4.2(2)), дозволено припустити, що обшивка має здатність стримувати переміщення в площині стінки елементів жорсткості при втраті стійкості, а отже опір втраті стійкості рекомендовано розраховувати за одним з двох альтернативних методів:

а) ігноруючи вплив обшивки, як такий, що стримує переміщення втрати стійкості в площині, нормальній до стінки;

б) враховуючи вплив обшивки, як такий, що стримує переміщення втрати стійкості в площині, нормальній до стінки.

(2) У методі (а) параграфу (1) опір окремого елемента жорсткості дозволено приймати як опір концентричному стиску елемента. Розрахункове значення опору втраті стійкості $N_{s,Rd}$ рекомендовано обчислювати за формулою (A.49):

$$N_{s,Rd} = \chi A_{eff} f_o / \gamma_{M1} \quad (A.49)$$

де A_{eff} — ефективна площа поперечного перерізу елемента жорсткості.

(3) Понижувальний коефіцієнт χ рекомендовано обчислювати за EN 1999-1-1 для втрати стійкості за згинальною формою перпендикулярно до стінки (по кільцевій осі) відповідно до типу сплаву, із застосуванням кривої втрати стійкості 2 незалежно від вибраного сплаву ($\alpha = 0,32$ і $\bar{\lambda}_0 = 0$). За ефективну довжину колони у визначенні понижувального коефіцієнта χ , рекомендовано приймати відстань між сусідніми кільцевими ребрами жорсткості.

(4) Пружний опір стінки втраті стійкості елемента жорсткості дозволено розглядати як розподіл пружин, жорсткість яких можна оцінити за наступними умовами:

а) Ділянка стінки, що, як вважається, забезпечує опір елемента жорсткості, має бути рівною сумі довжин стінки з кожного боку елемента жорсткості (див. Рисунок А.13), а також мати вільне обпирання на обох кінцях.

б) Враховувати жорсткість сипких або інших матеріалів, що можуть зберігатися всередині не рекомендовано.

(5) Якщо не проводяться більш точні розрахунки, пружне критичне навантаження втрати стійкості $N_{s,cr}$, рекомендовано розраховувати як для рівномірно розподіленого стиску, що діє на поперечний переріз на будь-якому рівні за формулою (А.50):

$$N_{s,cr} = 2\sqrt{EI_s k}, \quad (\text{А. 50})$$

де

EI_s — згинальна жорсткість елемента жорсткості на згин з площини стінки Нмм²);

k — згинальна жорсткість обшивки (Н/мм на мм висоти стінки) в прогоні між меридіональними елементами жорсткості, як це показано на рисунку А.13;

(6) Згинальну жорсткість стінової пластини k рекомендовано визначати з припущенням, що обшивка в прогоні між двома прилеглими меридіональними елементами жорсткості є вільно обпертою на обох кінцях (див. рисунок А.13). Значення k дозволено обчислювати за формулою (А.51):

$$k = \frac{6D_\theta}{d_s^3}, \quad (\text{А. 51})$$

де

D_θ — згинальна жорсткість листів при кільцевому згині;

d_s — крок меридіональних елементів жорсткості.

(7) Якщо гофрування має арково-тангенційну або синусоїдну форму, (див. рисунок А.14), значення D_θ дозволено приймати за А.7.7(6). Якщо використано іншу форму, згинальну жорсткість рекомендовано визначати

конкретно для даної форми поперечного перерізу.

(8) Розрахункові напруження в кожній точці елемента жорсткості мають задовольняти умову (A.52):

$$N_{s,Ed} \leq N_{s,Rd} \quad (A.52)$$

(9) Опір елементів жорсткості місцевому та згинальному крученню при втраті стійкості рекомендовано визначати за EN 1999-1-1.

A.7.4.4 Кільцевий стиск (обруч)

Правила, наведені у A.7.6.3 є справедливими для перевірки на втрату стійкості, якщо розглядати підкріплену стінку як ортотропну оболонку. EN 1999-1-5:2023 (E)

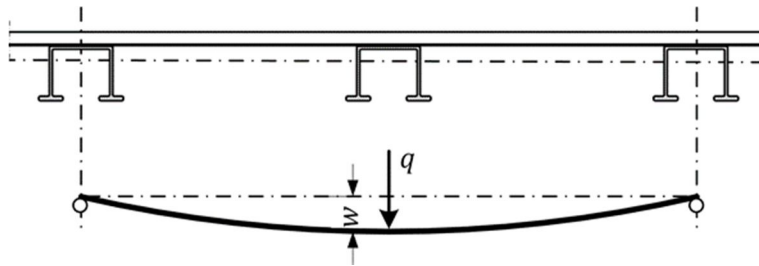


Рисунок А.13 — Опір пластинчастих елементів жорсткості k для оцінювання втрати стійкості колон

A.7.5 Гофровані в осьовому напрямку стінки з кільцевими ребрами жорсткості

A.7.5.1 Загальні положення

(1) Якщо циліндрична стінка має гофрування в осьовому напрямку, має бути дотримано обидві наступні умови:

а) рекомендовано припустити, що гофрована стінка не сприймає осьові навантаження;

б) рекомендовано припустити, що гофрована обшивка є розтягнутою між прилеглими кільцями і довжина прогону дорівнює відстані між центрами цих кілець. Також припускають, що обшивка є неперервною.

(2) Вузли між секціями обшивки мають забезпечити досягнення

припущення щодо їх неперервності.

(3) Для оцінювання осьових стискальних зусиль, що виникають у стінці внаслідок фрикційної взаємодії стінки з насипними матеріалами, рекомендовано враховувати весь периметр оболонки, а також форму гофрування.

(4) Якщо гофровані листи обшивки доходять до основи із заданими граничними умовами, то рекомендовано враховувати місцеву гнучкість обшивки поряд із краєм, припускаючи його радіальне закріплення.

(5) Рекомендовано прийняти припущення, що гофрована стінка не сприймає осьові навантаження.

(6) Крок кільцевих ребер жорсткості рекомендовано визначати за розрахунком балки на згин для гофрованого профілю, припускаючи неперервність стінки на кільцях та враховуючи наслідки різних радіальних переміщень для кільцевих ребер жорсткості різних розмірів. Напруження, спричинені таким згином, рекомендовано додавати до напружень від осьового стиску при перевірці на опір втраті стійкості під дією осьового стиску.

Примітка. Розрахунок на меридіональний згин можна виконати, розглядаючи обшивку як нерозрізну балку на пружних опорах, розташованих в місцях кілець. Жорсткість кожної опори обумовлена жорсткістю кільця в радіальному напрямку.

(7) Кільцеві ребра жорсткості, що призначені сприймати меридіональні навантаження, рекомендовано розраховувати за EN 1999-1-1.

A.7.5.2 Осьовий стиск

Правила, наведені у A.7.6.2 є справедливими для перевірки на втрату стійкості, якщо розглядати підкріплену стінку як ортотропну оболонку.

A.7.5.3 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Правила, наведені у А.7.6.3 є справедливими для перевірки на втрату стійкості, якщо розглядати підкріплену стінку як ортотропну оболонку.

А.7.6 Підкріплена стінка, розглянута як ортотропна оболонка

А.7.6.1 Загальні положення

(1) Якщо підкріплену стінку (ізотропну чи гофровану) розглядають як ортотропну оболонку, результуючі розмазаних жорсткостей рекомендовано приймати як рівномірно розподілені. Жорсткості обшивки у випадку гофрованих стінок в різних напрямках рекомендовано визначати за А.7.7.

(2) Властивості згину та розтягу кільцевих елементів жорсткості та стрингерів, а також зовнішній ексцентриситет між їх центральними осями і серединною поверхнею стінки оболонки, рекомендовано визначати одночасно з кроком елементів жорсткості d_s .

(3) Крок елементів жорсткості в меридіональному напрямку d_s (рисунок А.10) не має перевищувати значення $d_{s,max}$ заданого формулою (А.53):

$$d_{s,max} = 7,4 \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25}, \quad (A.53)$$

де

D_y і C_y — згинальна жорсткість і жорсткість на розтяг на одиницю ширини у кільцевому напрямку (паралельно до гофр, якщо йдеться про обшивку, гофровану у кільцевому напрямку).

А.7.6.2 Осьовий стиск

(1) Результуючі критичних напружень при втраті стійкості $n_{x,cr}$ на одиницю окружності ортотропної оболонки рекомендовано визначати на кожному рівні оболонки шляхом мінімізації формули (А.54) по відношенню до критичної кількості хвиль вигину у кільцевому напрямку j і висоти вигину

l_i :

$$n_{x,cr} = \frac{1}{j^2 \omega^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (\text{A.54})$$

за формулами (A.55) — (A.57):

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2 (C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad (\text{A.55})$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33})(C_{22} + j^2 C_{25})(C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33})(C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + \omega^2 C_{33})(C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad (\text{A.56})$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33})(C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad (\text{A.57})$$

3:

$C_{11} = C_\varphi + EA_s/d_s$ $C_{12} = v \sqrt{C_\varphi C_\theta}$ $C_{14} = e_s EA_s/(rd_s)$ $C_{44} = \frac{1}{r^2} (D_\varphi + EI_s/d_s + EA_s e_s^2/d_s)$ $C_{45} = \frac{v}{r^2} \sqrt{D_\varphi D_\theta}$ $\omega = \frac{\pi r}{j l_i}$	$C_{22} = C_\theta + EA_r/d_r$ $C_{33} = C_{\varphi\theta}$ $C_{25} = e_r EA_r/(rd_r)$ $C_{55} = \frac{1}{r^2} (D_\theta + EI_r/d_r + EA_r e_r^2/d_r)$ $C_{66} = \frac{1}{r^2} [D_{\varphi\theta} + 0,5(GI_{ts}/d_s + GI_{tr}/d_r)]$
--	--

Національна примітка

У вищенаведеній таблиці замість C_φ має бути C_ϕ , замість $C_{\varphi\theta}$ має бути $C_{\phi\theta}$, замість D_φ має бути D_ϕ , замість $D_{\varphi\theta}$ має бути $D_{\phi\theta}$.

де

l_i — половина довжини хвилі ймовірного вигину в меридіональному напрямку;

j — кількість хвиль вигину у кільцевому напрямку;

A_s — площа поперечного перерізу стрингера;

I_s — момент інерції стрингера відносно кільцевої осі серединної поверхні оболонки (при меридіональному згині);

d_s — крок стрингерів;

I_{ts} — постійна рівномірного кручення стрингера;
 e_s — зовнішній ексцентриситет стрингера від серединної поверхні оболонки;
 A_r — площа поперечного перерізу кільцевого ребра жорсткості;
 I_r — момент інерції кільцевого ребра жорсткості відносно меридіональної осі серединної поверхні оболонки (при кільцевому згині);
 d_r — це відстань між кільцевими ребрами жорсткості;
 I_{tr} — постійна кручення кільцевого ребра жорсткості;
 e_r — зовнішній ексцентриситет кільцевого ребра жорсткості до серединної поверхні оболонки;
 C_ϕ — жорсткість на розтяг в осьовому напрямку;
 C_θ — жорсткість на розтяг в кільцевому напрямку;
 $C_{\phi\theta}$ — жорсткість на розтяг при мембранному зсуві;
 D_ϕ — жорсткість на згин в осьовому напрямку;
 D_θ — жорсткість на згин в кільцевому напрямку;
 $D_{\phi\theta}$ — крутильно-згинальна жорсткість при крученні;
 r — радіус оболонки.

Примітка 1. У випадку гофрованої обшивки, вищевказані властивості елементів жорсткості (A_s , I_s , I_{ts} тощо) стосуються лише перерізів самих елементів жорсткості, тобто в цих перерізах не дозволено враховувати ефективний переріз, що містить прилеглі частини стінки оболонки.

Примітка 2. Щодо жорсткості на розтяг та згинальної жорсткості гофрованої обшивки див. А.7.7.

Примітка 3. За нижню межу згину можна прийняти або точку зміни товщини стінки або зміну поперечного перерізу елемента жорсткості. Опір втраті стійкості в кожній з таких точок має бути перевірений окремо.

(2) Розрахунковий опір втраті загальної стійкості $n_{x,Rd}$ ортотропної оболонки рекомендовано визначати як вказано у А.3.2 та 8.2.3.2.

Критичний опір втраті стійкості $n_{x,cr}$ рекомендовано обчислювати за параграфом (1).

(3) Понижувальний коефіцієнт $\chi_{x,perf}$ рекомендовано обчислювати відповідно до 8.2.3.2(2) для згинальної втрати стійкості перпендикулярних до стінки елементів жорсткості, із застосуванням значень, наведених у таблиці A.13:

Таблиця A.13 — Значення $\bar{\lambda}_{x,0}$ та μ_x для підкріплених оболонок під дією меридіонального стиску

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{x,0}$	μ_x
A	0,9	0,3
B	0,85	0,4
C	0,7	0,5

Ефективна довжина колони для визначення понижувального коефіцієнта $\chi_{x,perf}$ підкріпленої оболонки рекомендовано приймати як відстань між сусідніми кільцевими ребрами жорсткості d_r . Рекомендовано застосовувати значення коефіцієнта недосконалості $\alpha_x = 0,8$.

A.7.6.3 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Критичне напруження при втраті стійкості для рівномірного зовнішнього тиску $p_{n,cr}$ рекомендовано оцінювати шляхом мінімізації формули (A.58) відносно критичної кількості хвиль вигину у кільцевому напрямку j :

$$p_{n,cr} = \frac{1}{rj^2} \left(A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad (A.58)$$

З A_1 , A_2 і A_3 , як наведено у A.7.6.2 (1).

(2) Якщо елементи жорсткості або обшивки змінюються зі збільшенням висоти стінки, рекомендовано вивчити кілька потенційних розрахункових довжин l_i , щоб обрати з них критичну, користуючись припущенням, що верхня межа вигину знаходиться на вершині зони з найтоншою стінкою.

Примітка. Якщо зона обшивки з товстішою стінкою розташована над зоною з тоншою стінкою, то верхня межа ймовірного вигину може знаходитись на вершині тоншої зони або на вершині стінки.

(3) Якщо не проводяться більш точні розрахунки, товщину, зазначену у вищенаведеному розрахунку, рекомендовано прийняти як товщину найтоншої частини обшивки.

(4) Якщо оболонка не має даху і потенційно схильна до втрати стійкості під дією вітрового тиску, отримане вище значення тиску рекомендовано множити на 0,6.

(5) Розрахункове напруження втрати стійкості для стінки рекомендовано визначати за положеннями 8.2.3.2 та А.3.3 відповідно до класу допуску оболонки. Критичний тиск втрати стійкості $p_{n,cr}$ рекомендовано визначати за викладеним вище параграфом (1). Коефіцієнт C_θ у А.3.3.2 рекомендовано приймати як $C_\theta = 1,0$.

А.7.6.4 Зсув

(1) Для цього випадку застосовні наведені у А.7.2.4 правила для ізотропних стінок з меридіональними елементами жорсткості.

А.7.7 Еквівалентні ортотропні властивості гофрованих листів

(1) Якщо гофровані листи є частиною конструкції оболонки, розрахунок дозволено виконувати розглядаючи обшивку як еквівалентну ортотропну стінку рівномірної товщини.

(2) Наведені нижче характеристики дозволено застосовувати для розрахунку напруженого стану та розрахунку на втрату стійкості конструкції, якщо гофрована обшивка має арково-тангенціальну або синусоїдну форму (див. рисунок А.14). Якщо застосовано іншу форму, відповідні характеристики необхідно визначати конкретно для даного поперечного перерізу за EN 1999-1-4.

(3) Характеристики гофрованих листів рекомендовано визначати через систему координат x - y у якій вісь y направлено паралельно до гофр (рівні лінії на поверхні) тоді як x направлено перпендикулярно до гофр (западин і вершин). Гофрування рекомендовано визначати через два наступні параметри, незалежно від фактичного профілю гофр (див. Рисунок А.14):

d — відстань між двома вершинами гребеня;

l — довжина хвилі гофра;

r_ϕ — це місцевий радіус гребеня або западини.

(4) Всі характеристики є лінійними і не спричиняють ефекту Пуассона між різними напрямками.

(5) Еквівалентні мембранні характеристики (жорсткість на розтяг) дозволено визначати за (А.59) — (А.61):

$$C_x = Et_x = E \frac{2t^3}{3d^2} \quad (\text{А. 59})$$

$$C_y = Et_y = Et \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) \quad (\text{А. 60})$$

$$C_{xy} = Gt_{xy} = \frac{Gt}{1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}}, \quad (\text{А. 61})$$

де

t_x — еквівалентна товщина для розмазаних мембранних сил, перпендикулярних гофрам;

t_y — еквівалентна товщина для розмазаних мембранних сил, паралельних гофрам;

t_{xy} — еквівалентна товщина для розмазаних мембранних зсувних сил.

(6) Еквівалентні згинальні характеристики (жорсткість на згин) визначені, через згинальну жорсткість під дією моментів, що спричиняють згин у відповідному напрямку (не навколо осі), і можуть бути визначені за

формулами (A.62) — (A.64):

$$D_x = EI_x = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}} \quad (\text{A. 62})$$

$$D_y = EI_y = \frac{Etd^2}{8} \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{8l^2} \right) \quad (\text{A. 63})$$

$$D_{xy} = GI_{xy} = \frac{Gt^3}{12} \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right), \quad (\text{A. 64})$$

де

I_x — еквівалентний момент інерції для розмазаного згину, перпендикулярного до гофр;

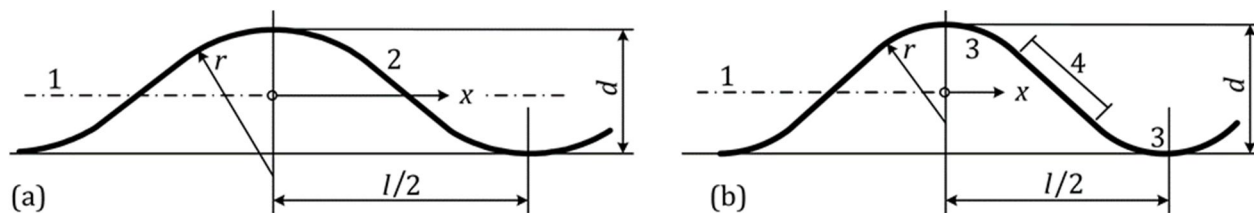
I_y — еквівалентний момент інерції для розмазаного згину, паралельного до гофр;

I_{xy} — еквівалентний момент інерції для кручення.

Примітка. Згин паралельно гофруванню підвищує згинальну жорсткість гофрованого профілю і є головною перевагою застосування гофрованих конструкцій.

(7) У кільцевих оболонках з кільцевим гофруванням напрямки осей x та y в наведених вище формулах рекомендовано замінити на осьовий ϕ та кільцевий, θ напрямки відповідно. При меридіональному гофруванні напрямки осей x та y в наведених вище формулах рекомендовано замінити на кільцевий θ та осьовий ϕ напрямки відповідно (див. рисунок А.14).

(8) Зсувні характеристики рекомендовано приймати незалежно від орієнтації гофрування. Значення G дозволено приймати за $E/2,6$.



Умовні позначки:

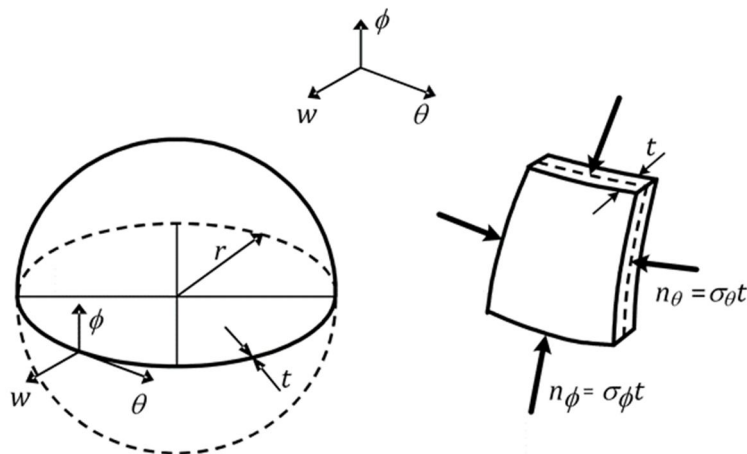
- 1 — ефективна серединна поверхня;
- 2 — синусоїдальна;
- 3 — арково;
- 4 — тангенційна.

Рисунок А.14 — Типи профілів: арково-тангенційний (а), синусоїдальний (б) та геометричні характеристики гофр

А.8 Непідкріплені сферичні оболонки під дією рівномірного кільцевого стиску

А.8.1 Позначки та граничні умови

- (1) Загальні значення показано на рисунку А.15.
- (2) Граничні умови наведено в 7.2 та 8.2.2.



Умовні позначки:

- r — радіус серединної поверхні сфери;
- t — товщина стінки оболонки.

Рисунок А.15 — Геометричні характеристики сфери, мембранні та результуючі напруження

А.8.2 Критичне напруження при втраті стійкості

(1) Наступні формули справедливі тільки для замкнутих сфер або сферичних куполів із граничними умовами BC1r чи BC1f на опорній грані. Зовнішній тиск можна розкласти на дві складові напруження. Під час перевірки кільцевого напруження враховують обидві складові.

(2) Рівномірно розподілений кільцевий стиск у сферах або сферичних куполах може бути викликаний рівномірним зовнішнім тиском або навантаженнями, що діють на силоси чи дахи резервуарів круглого перерізу під час їх завантаження.

(3) У випадку кільцевого стиску, обумовленого рівномірним зовнішнім тиском p відповідні напруження визначають за формулою (A.65):

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\varphi} = pr/2t \quad (\text{A.65})$$

(4) Критичні напруження при втраті стійкості під дією рівномірного кільцевого стиску рекомендовано обчислювати за формулою (A.66):

$$\sigma_{\theta,cr} = \sigma_{\varphi,cr} = 0,605 Et/r \quad (\text{A.66})$$

A.8.3 Параметр кільцевої втрати стійкості

(1) Коефіцієнт недосконалості рекомендовано визначати за формулою (A.67):

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 0,6 \left(\frac{1}{Q^{0,7}} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,6}}, \text{ але } \alpha_{\theta} \leq 1,00, \quad (\text{A.67})$$

де

Q — параметр допуску.

(2) Параметр допуску Q рекомендовано приймати за таблицею A.14 для вказаного класу допуску.

(3) Коефіцієнт сплаву та параметр гнучкості для граничного зминання рекомендовано приймати за таблицею A.15 залежно від класу гнучкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

Таблиця А.14 — Параметр допуску Q

Клас допусків	Q
Клас 1	16
Клас 2	25
Клас 3 та 4	40

Таблиця А.15 — Значення $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ та μ_{θ} для рівномірного кільцевого стиску

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
A	0,6	0,3
B	0,65	0,35
C	0,7	0,4

ДОДАТОК В

(довідковий)

ФОРМУЛИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НА СТІЙКІСТЬ ТОРО-КОНІЧНИХ І ТОРО-СФЕРИЧНИХ ОБОЛОНОК**В.1 Застосування цього додатка**

Цей довідковий додаток містить додаткові вказівки до наведених у розділі 8.2.3.2

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатка наведено в національному додатку. Цей додаток можна застосовувати, за умови, що національний додаток не містить інформації щодо його застосування.

В.2 Сфера та область застосування

(1) Цей довідковий додаток охоплює конічні та сферичні кінці циліндричних оболонок або еквівалентних конструкцій, приєднаних за допомогою торичного сегмента чи безпосередньо до циліндру ($r_T = 0$).

В.3 Позначки та граничні умови

(1) У цьому розділі застосовано наступні позначки, див. рисунок В.1:

r — радіус серединної поверхні циліндричної оболонки;

r_S — радіус сферичної оболонки;

α — кут торичної оболонки або половина кута при вершині конічної оболонки;

r_T — радіус тора;

t_T — товщина торичної, конічної чи сферичної оболонки;

l — довжина з'єднувального циліндра;

t_C — товщина стінки з'єднувального циліндра.

(2) Правила є дійсними для постійного зовнішнього тиску, що діє

перпендикулярно до поверхні оболонки.

(3) Сферу застосування обмежено формулами (B.1) — (B.6):

$$t_T \leq t_C \quad (B.1)$$

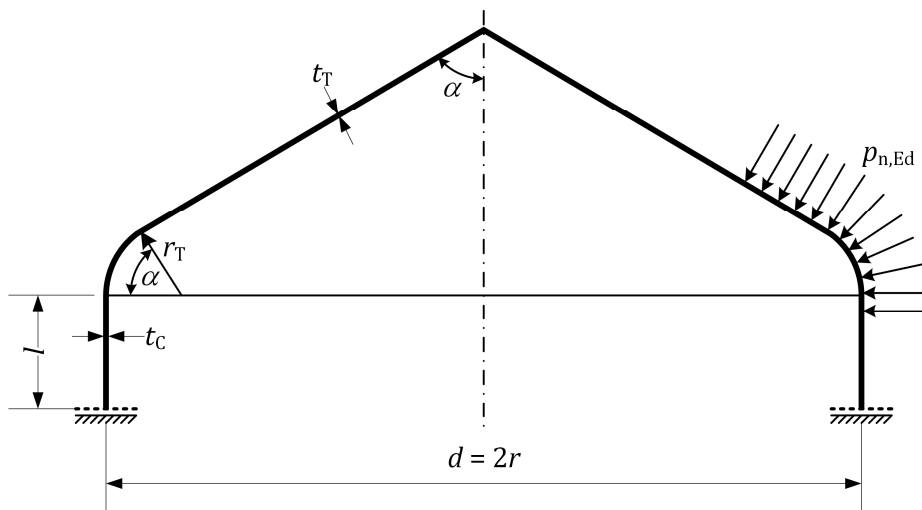
$$35 \leq r/t_C \leq 1250 \quad (B.2)$$

$$45^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ \quad (B.3)$$

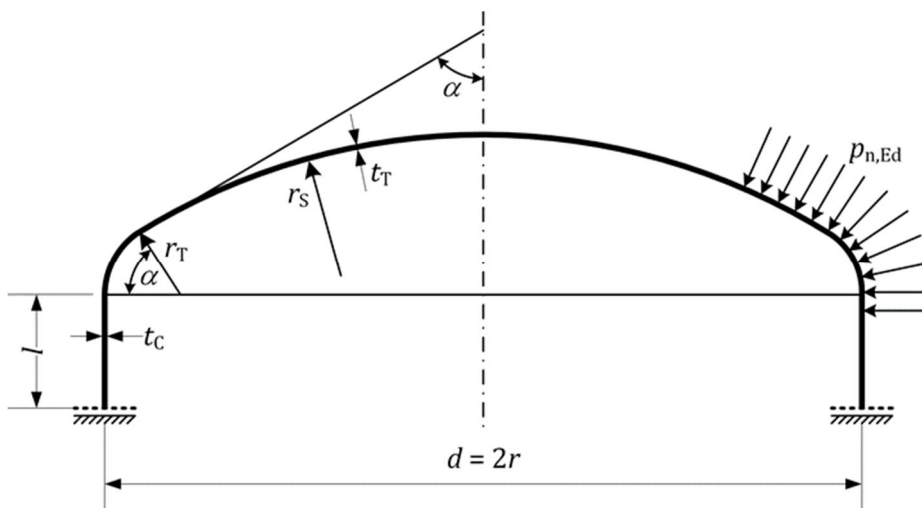
$$0 \leq r_T/r \leq 0,4 \quad (B.4)$$

$$1,2 \leq r_S/r \leq 3 \quad (B.5)$$

$$1 \leq 1000 f_o/E \leq 4 \quad (B.6)$$



а) торо-конічна форма



б) торо-сферична форма

Рисунок В.1 — Геометричні характеристики і навантаження на кінцях резервуара

В.4 Зовнішній тиск

В.4.1 Критичний зовнішній тиск

(1) Критичне значення зовнішнього тиску (з умов втрати стійкості) для торо-конічної оболонки задано формулою (В.7):

$$p_{n,cr} = \frac{2,42}{(1 - \nu^2)^{0,75}} E \sin\alpha (\cos\alpha)^{1,5} \left(\frac{t_T}{\bar{r}}\right)^{2,5} \quad \text{або} \quad (B.7)$$

$$p_{n,cr} = 2,60 E \sin\alpha (\cos\alpha)^{1,5} (t_T/\bar{r})^{2,5} \quad \text{для } \nu = 0,3, ,$$

де

$$\bar{r} = r - r_T(1 - \cos\alpha) + \sqrt{r_T t_T} \sin\alpha, \text{ але } \bar{r} \leq r$$

(2) Критичне значення зовнішнього тиску з умов втрати стійкості для торо-сферичної оболонки задано формулою (В.8):

$$p_{n,cr} = 1,21 C_k E \left(\frac{t_T}{r_s}\right)^2 \quad (B.8)$$

з

$$C_k = (r_s/r)^2 \beta^{0,7\sqrt{r_s/r-1}}$$

де β , більше зі значень $\beta = 0,105(t_c/r)^{0,19}$ і $\beta = 0,088(r_T/r)^{0,23}$.

В.4.2 Рівномірний зовнішній тиск від граничного зминання

1) Рівномірний зовнішній тиск від граничного зминання для торо-конічних та торо-сферичних оболонок визначають за формулою (В.9) або за графіком на рисунку В.2 чи для $r_T = 0$, можуть наближено прийняти за формулами (В.10) або (В.11)

$$p_{n,Rk} = f_o \left(14,5 - 450 \frac{f_o}{E}\right) \left(1 + 2 \frac{r_T}{r} + 7,13 \left(\frac{r_T}{r}\right)^2\right) \frac{\cos\alpha}{\left(\frac{2r}{t_T}\right)^{1,5}} \quad (B.9)$$

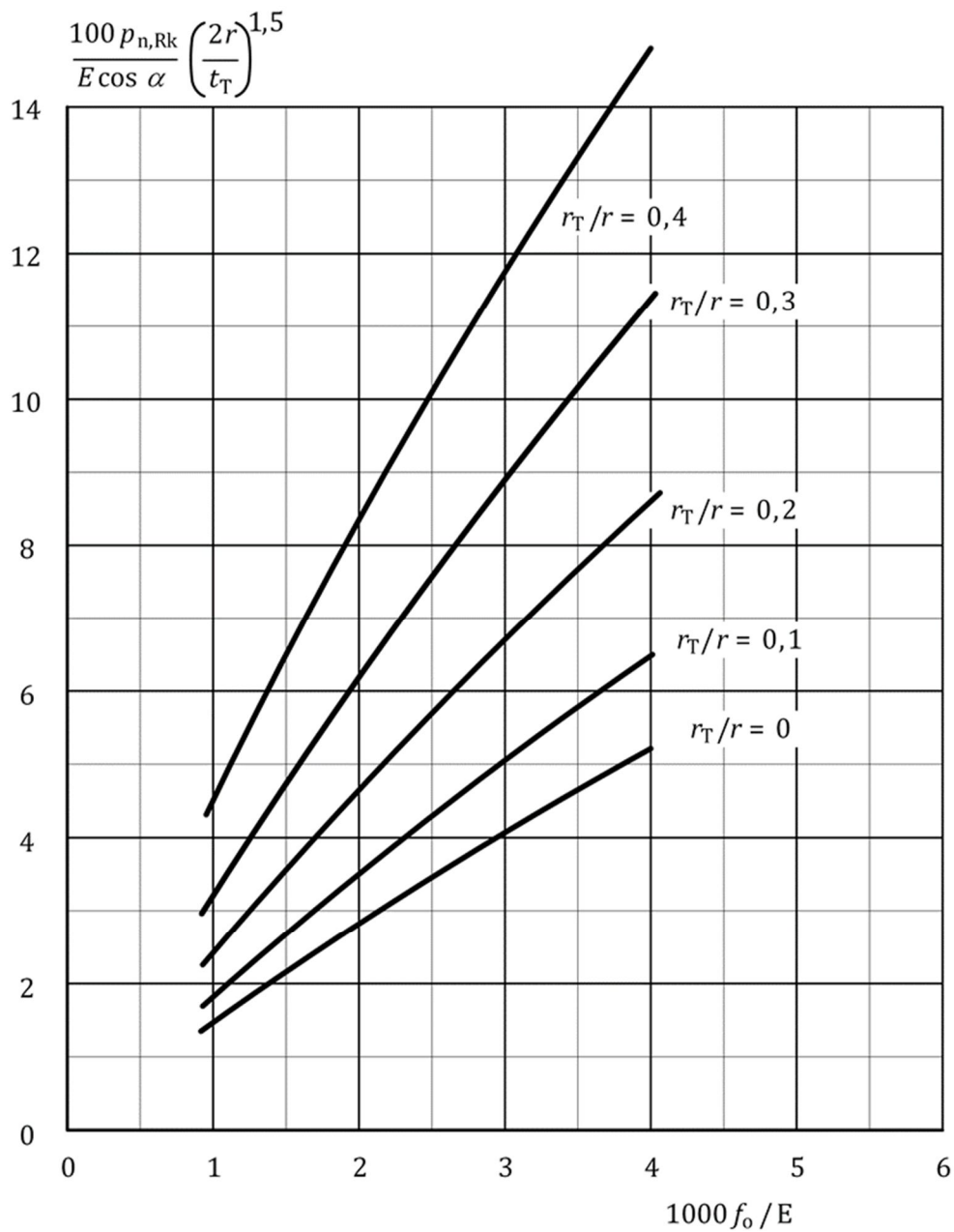


Рисунок В.2 — Пластичний зовнішній тиск для торо-конічних та торо-сферичних оболонок

— для торо-конічної оболонки:

$$p_{n,Rk} = 4,4 \sqrt{\frac{t_T}{r}} f_0 \frac{t_T}{r/\cos\alpha} \quad (\text{В. 10})$$

— для торо-сферичної оболонки

$$p_{n,Rk} = 4,4 \sqrt{\frac{t_T}{r}} f_0 \frac{t_T}{r_s} \quad (\text{В. 11})$$

В.4.3 Параметр втрати стійкості під дією зовнішнього тиску

(1) Коефіцієнт недосконалості рекомендовано визначати за:(В.12):

$$\alpha_{\theta,x} = \frac{1}{1 + 0,6 \left(\frac{1}{Q^{0,7}} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,6}}, \text{ але } \alpha_{\theta,x} \leq 1,00, \quad (\text{В. 12})$$

де

Q — параметр допуску.

(2) У формулі (8.17) для $\sigma_{\theta,cr}$, формулу (А.10) рекомендовано застосовувати із t_T/r_S або t_T/r як параметр гнучкості для торо-конічних та торо-сферичних оболонок відповідно.

(3) Параметр допуску Q рекомендовано приймати за таблицею В.1 для відповідного класу допуску.

(4) Коефіцієнт сплаву та параметр гнучкості для граничного зминання рекомендовано приймати за таблицею В.2 залежно від класу гнучкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

Таблиця В.1 — Параметр допуску Q

Клас допусків	Q
Клас 1	16
Клас 2	25
Клас 3 та 4	40

Таблиця В.2 — Значення $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ та μ_{θ} для зовнішнього тиску

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
А	0,6	0,3
В	0,65	0,35
С	0,7	0,4

В.5 Внутрішній тиск

В.5.1 Критичний внутрішній тиск

(1) Критичне значення внутрішнього тиску (з умов втрати стійкості) для торо-конічної оболонки обчислюють за формулами (В.13) та (В.14):

$$p_{n,cr} = 1000E \left(\frac{56300}{\alpha^{2,5}} - 0,71 \right) \left(\frac{t}{2r} \right)^3, \text{ якщо } r_T/2r = 0 \quad (\text{В. 13})$$

$$p_{n,cr} = 1000\eta E \frac{r_T}{2r} \left(\frac{t}{2r} \right)^3, \text{ якщо } r_T/2r \neq 0 \quad (\text{В. 14})$$

де параметр η рекомендовано приймати за рисунком В.3.

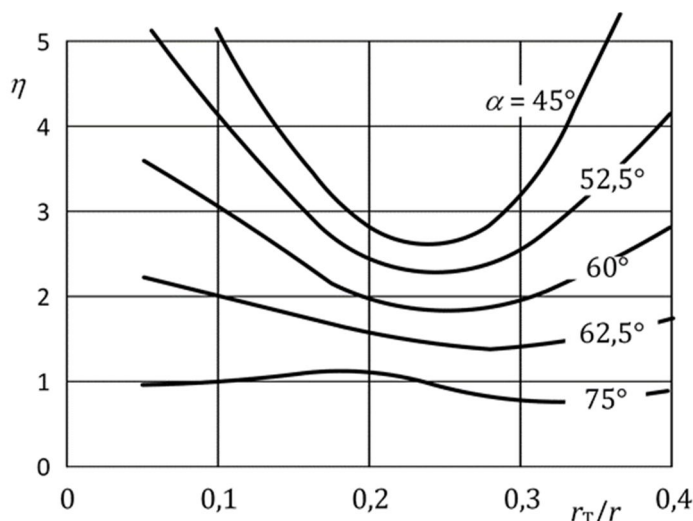


Рисунок В.3 — параметр η для формули (В.14)

(2) Критичне значення внутрішнього тиску (з умов втрати стійкості) для торо-сферичної оболонки обчислюють за формулою (В.15):

$$p_{n,cr} = 100E \left(1,85 \frac{r_T}{r} + 0,68 \right) \left(\frac{t}{r_S} \right)^{2,45} \quad (\text{В. 15})$$

В.5.2 Рівномірний внутрішній тиск від граничного зминання

Граничний рівномірний внутрішній тиск від граничного зминання торо-конічних чи торо-сферичних оболонок визначають за формулою (В.16) або за графіком на рисунку В.4.

$$p_{n,Rk} = f_0 \left(1,2 - 120 \frac{f_0}{E} \right) \left(1 + 3,9 \frac{r_T}{r} + 67 \left(\frac{r_T}{r} \right)^2 \right) \frac{\cos \alpha}{\left(\frac{2r}{t_T} \right)^{1,25}} \quad (\text{В. 16})$$

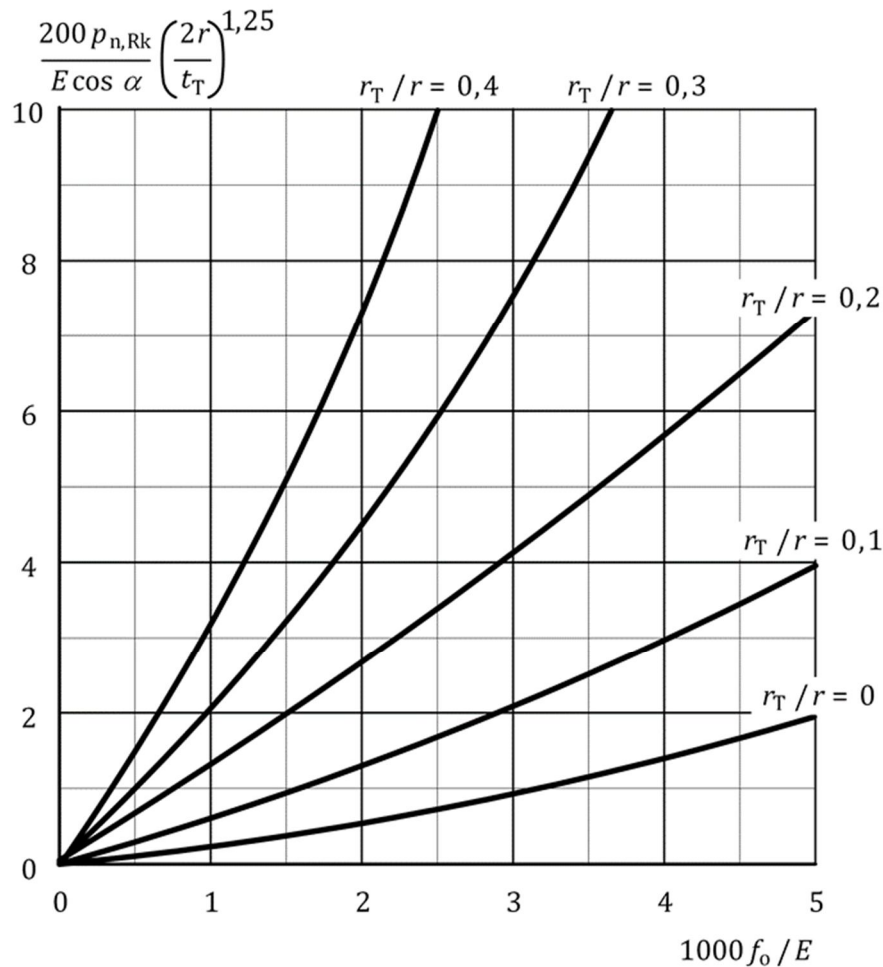


Рисунок В.4 — Пластичний внутрішній тиск для торо-конічних та торо-сферичних оболонок

В.5.3 Параметр втрати стійкості під дією внутрішнього тиску

(1) Коефіцієнт недосконалості рекомендовано визначати за формулою (В.17):

$$\alpha_{\theta,x} = \frac{1}{1 + 0,6 \left(\frac{1}{Q^{0,7}} \sqrt{\frac{r}{t}} \right)^{1,6}}, \text{ але } \alpha_{\theta,x} \leq 1,00, \quad (\text{В.17})$$

де

Q — параметр допуску.

(2) У формулі (8.17) для $\sigma_{\theta,cr}$, формулу (А.10) рекомендовано застосовувати із t_T/r_s or t_T/r , як параметром гнучкості для тор-конічних та

торо-сферичних оболонок відповідно.

(3) Параметр допуску Q рекомендовано приймати за таблицею В.3 для відповідного класу допуску.

(4) Коефіцієнт сплаву та параметр гнучкості для граничного зминання рекомендовано приймати за таблицею В.4 залежно від класу гнучкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

Таблиця В.3 — Параметр допуску Q для внутрішнього тиску

Клас допусків	Q
Клас 1	16
Клас 2	25
Клас 3 та 4	40

Таблиця В.4 — Значення $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ та μ_{θ} для внутрішнього тиску

Клас втрати стійкості матеріалу	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
A	0,6	0,3
B	0,65	0,35
C	0,7	0,4

БІБЛІОГРАФІЯ

Посилання, наведені в рекомендаціях (тобто через пункти «рекомендовано»)

Посилання на нижчеперелічені документи наведено в тексті так, що частина або весь їх вміст, являють собою настійно рекомендований вибір або напрям дій в рамках даного стандарту. Застосування альтернативних стандартів можливе / дозволене за умови технічного обґрунтування відповідно до національного законодавства та / або будь-яких відповідних договірних положень. У разі датованих посилань застосовують тільки наведені видання. У разі недатованих посилань

1. EN 1090-3 Execution of steel structures and aluminium structures — Part 3: Technical requirements for aluminium structures
2. EN 1999-1-4:2023 Eurocode 9 — Design of aluminium structures — Part 1-4: Cold-formed structural sheeting
3. EN 1993-3 Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 3: Towers, masts and chimneys
4. EN 1993-4-1 Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 4-1: Silos
5. EN 1993-4-2 Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 4-2: Tanks

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

1. EN 1090-3 Е Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 3. Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій
2. EN 1999-1-4:2023 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-4. Холодноформовані листи
3. EN 1993-3 Єврокод 3 Проектування сталевих конструкцій. Частина 3. Башти, щогли і димові труби
4. EN 1993-4-1 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-1. Силоси

5. EN 1993-4-2 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій.
Частина 4-2. Резервуари

Посилання, наведені в якості інформаційних (тобто, через пункти «має можливість»)

6. EN 1991 (all parts) Eurocode 1 — Actions on structures

7. EN 1993-1-6 Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-6:
Strength and stability of shell structures

8. EN 1999-1-2 Eurocode 9 — Design of aluminium structures — Part 1-
2: Structural fire design

9. EN ISO 12944-2 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel
structures by protective paint systems — Part 2: Classification of environments
(ISO 12944-2)

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

6. EN 1991 (всі частини) Єврокод 1. Дії на конструкції

7. EN 1993-1-6 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій.
Частина 1-6. Міцність та стійкість оболонок

8. EN 1999-1-2 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій.
Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість

9. EN ISO 12944-2 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих
конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 2.
Класифікація середовищ

ДОДАТОК НА

(довідковий)

**ПЕРЕЛІК НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ УКРАЇНИ, ІДЕНТИЧНИХ
ЄВРОПЕЙСЬКИМ ТА МІЖНАРОДНИМ НОРМАТИВНИМ ДОКУМЕНТАМ,
ПОСИЛАННЯ НА ЯКІ Є В ЦЬОМУ СТАНДАРТІ**

ДСТУ EN 1990 Єврокод. Основи проєктування конструкцій;

ДСТУ EN 1999-1-1 (EN 1999-1-1:2023, IDT) Єврокод 9. Проєктування
алюмінієвих конструкцій. Частина 1-1 Загальні правила

Ключові слова: алюмінієві сплави, вузлові з'єднання, клейові з'єднання, конструкції, корозія, моделювання

Генеральний директор
ТОВ «Укрінсталькон
ім. В.М. Шимановського»,
заслужений діяч науки і техніки України,
член-кореспондент НАНУ, д.т.н., проф.

О. В. Шимановський

Заступник генерального директора з
науково-технічної політики,
заступник голови ТК 301

В. П. Адріанов

Завідувач відділу науково-технічного
розвитку
(науковий керівник розробки)

О. І. Кордун

Завідувач групи

Я. В. Лимар

Провідний редактор-перекладач

В. П. Гаврилова