



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**ЄВРОКОД 9. ПРОЕКТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ
КОНСТРУКЦІЙ**

**Частина 1-5. Конструкції оболонок
(EN 1999-1-5:2007, IDT)**

ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5:201X

(проект, остаточна редакція)

Київ
Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального
господарства України

201X

ПЕРЕДМОВА

1 РОЗРОБЛЕНО: Товариство з обмеженою відповідальністю «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського»

ПЕРЕКЛАД І НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ РЕДАГУВАННЯ: **С. Виноград, В. Гордєєв** д.т.н. (науковий керівник), **А. Гром, к.т.н., О. Кордун, Я. Левченко, Г. Ленда, Я. Лимар, О. Шимановський**, д.т.н.

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від «____» _____ 20__ № ____

3 Національний стандарт відповідає EN 1999-1-5:2007 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-5: Shell structures (Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонки) з технічною поправкою EN 1999-1-5:2007/AC:2009.

Ступінь відповідності – ідентичний (IDT)

Переклад з англійської (en)

Цей стандарт видано з дозволу CEN

4 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

**Право власності на цей документ належить державі.
Цей документ не може бути повністю чи частково відтворений, тиражований
і розповсюджений як офіційне видання без дозволу
Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Даний стандарт є тотожний переклад EN 1999-1-5:2007 " Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part 1-5: Shell structures" (Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонок) з технічною поправкою EN 1999-1-5:2007/AC:2009.

EN 1999-1-5 підготовлено Технічним комітетом CEN/TC 250, секретаріатом якого керує BSI.

До національного стандарту долучено англomовний текст.

На території України як національний стандарт діє ліва колонка тексту ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5:201X " Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонок (EN 1999-1-5:2007, IDT)», викладена українською мовою.

Відповідно до ДБН А.1.1-1-2009 «Система стандартизації та нормування в будівництві. Основні положення» цей стандарт відноситься до комплексу В.2.6 «Конструкції будинків і споруд».

Стандарт містить вимоги, які відповідають чинному законодавству.

Науково-технічна організація, відповідальна за цей стандарт, – Товариство з обмеженою відповідальністю «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського».

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- слова «цей міжнародний стандарт» замінено на «цей стандарт»;
- структурні елементи стандарту: «Обкладинку», «Передмову», «Національний вступ», «Визначення понять» оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;
- з «Передмови до EN 1999-1-5» у цей «національний вступ» взяте те, що безпосередньо стосується цього стандарту;
- національний довідковий додаток наведено як настанову для користувачів.

Перелік національних стандартів України (ДСТУ), ідентичних МС, посилення на які є в EN 1999-1-5:2007, наведено в додатку НА.

Технічна поправка EN 1999-1-5:2007/AC до EN 1999-1-5:2007 подана в кінці ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5:201X.

Копії МС, неприйнятих як національні стандарти, на які є посилення в EN 1999-1-5:2007, можна отримати в Головному фонді нормативних документів ДП «УкрНДНЦ».

ЗМІСТ

Вступ	Foreword	C. VIII
Основи програми Єврокодів	Background of the Eurocode programme	1
Статус та галузь застосування Єврокодів	Status and field of application of eurocodes	3
Національні стандарти, що впроваджують Єврокоди	National Standards implementing Eurocodes	4
Зв'язки між Єврокодами та гармонізованими технічними специфікаціями (ENs та ETAs) для виробів	Links between Eurocodes and harmonised technical specifications (ENs and ETAs) for products	5
Національний додаток до EN 1999-1-5	National annex for EN 1999-1-5	5
1 Загальні положення	1 General	6
1.1 Галузь застосування	1.1 Scope	6
1.1.1 Галузь застосування EN 1999	1.1.1 Scope of EN 1999	6
1.1.2 Галузь застосування EN 1999-1-5	1.1.2 Scope of EN 1999-1-5	7
1.2 Нормативні посилання	1.2 Normative references	9
1.3 Терміни та визначення	1.3 Terms and definitions	10
1.3.1 Форми та геометрія конструкцій	1.3.1 Structural forms and geometry	10
1.3.2 Окремі визначення щодо розрахунку на втрату стійкості	1.3.2 Special definitions for buckling calculations	12
1.4 Позначення	1.4 Symbols	13
1.5 Правило знаків	1.5 Sign conventions	18
1.6 Системи координат	1.6 Coordinate systems	19
2 Основи проектування	2 Basis of design	20
2.1 Загальні положення	2.1 General	20
2.2 Клас за відповідальністю та клас за виконанням	2.2 Consequence class and execution class	21
3 Матеріали та геометрія	3 Materials and geometry	21
3.1 Властивості матеріалів	3.1 Material properties	21
3.2 Розрахункові значення геометричних даних	3.2 Design values of geometrical data	21
3.3 Геометричні допуски і геометричні дефекти	3.3 Geometrical tolerances and geometrical imperfections	22
4 Довговічність	4 Durability	22
5 Розрахунок конструкцій	5 Structural analysis	22
5.1 Геометричні характеристики	5.1 Geometry	22
5.2 Граничні умови	5.2 Boundary conditions	23
5.3 Дії та впливи навколишнього середовища	5.3 Actions and environmental influences	24
5.4 Результуючі напруження та напруження	5.4 Stress resultants and stresses	25
5.5 Види розрахунку	5.5 Types of analysis	26
6 Граничний стан за несучою здатністю	6 Ultimate limit state	28
6.1 Опір поперечного перерізу	6.1 Resistance of cross section	28
6.1.1 Розрахункові значення напружень	6.1.1 Design values of stresses	28
6.1.2 Розрахункові значення опору	6.1.2 Design values of resistance	30
6.1.3 Обмеження напружень	6.1.3 Stress limitation	30
6.1.4 Проектування шляхом числового аналізу	6.1.4 Design by numerical analysis	30
6.2 Опір втраті стійкості	6.2 Buckling resistance	32

6.2.1	Загальні положення	6.2.1	General	32
6.2.2	Характерні для втрати стійкості геометричні допуски	6.2.2	Buckling-relevant geometrical tolerances	33
6.2.3	Оболонки під сумісною дією стиску і зсуву	6.2.3	Shell in compression and shear	33
6.2.4	Вплив зварювання	6.2.4	Effect of welding	38
6.2.5	Проектування шляхом числового аналізу	6.2.5	Design by numerical analysis	43
7	Граничні стани за експлуатаційною придатністю	7	Serviceability limit states	43
7.1	Загальні положення	7.1	General	43
7.2	Прогини	7.2	Deflections	43
Додаток А (обов'язковий) – Вирази для розрахунку оболонок на втрату стійкості		Annex A [normative] - Expressions for shell buckling analysis		44
A.1	Непідсилені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки	A.1	Unstiffened cylindrical shells of constant wall thickness	44
A.1.1	Позначення та граничні умови	A.1.1	Notations and boundary conditions	44
A.1.2	Меридіональний (осьовий) стиск	A.1.2	Meridional (axial) compression	44
A.1.2.1	Критичні меридіональні напруження при втраті стійкості	A.1.2.1	Critical meridional buckling stresses	44
A.1.2.2	Меридіональний коефіцієнт втрати стійкості	A.1.2.2	Meridional buckling parameter	46
A.1.3	Кільцевий стиск (обруч)	A.1.3	Circumferential (hoop) compression	47
A.1.3.1	Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості	A.1.3.1	Critical circumferential buckling stresses	48
A.1.3.2	Кільцеві коефіцієнти втрати стійкості	A.1.3.2	Circumferential buckling parameter	49
A.1.4	Зсув	A.1.4	Shear	51
A.1.4.1	Критичні дотичні напруження при втраті стійкості	A.1.4.1	Critical shear buckling stresses	51
A.1.4.2	Коефіцієнти втрати стійкості у випадку зсуву	A.1.4.2	Shear buckling parameters	52
A.1.5	Меридіональний (осьовий) стиск із внутрішнім тиском	A.1.5	Meridional (axial) compression with coexistent internal pressure	53
A.1.5.1	Критичне меридіональне напруження при втраті стійкості під дією тиску	A.1.5.1	Pressurised critical meridional buckling stress	53
A.1.5.2	Коефіцієнти меридіональної втрати стійкості під дією тиску	A.1.5.2	Pressurised meridional buckling parameters	53
A.1.6	Сумісна дія меридіонального (осьового) стиску, кільцевого стиску і зсуву	A.1.6	Combinations of meridional (axial) compression, circumferential (hoop) compression and shear	55
A.2	Непідсилені циліндричні оболонки зі ступінчастою змінною товщиною стінки	A.2	Unstiffened cylindrical shells of stepwise wall thickness	57
A.2.1	Загальні положення	A.2.1	General	57
A.2.1.1	Позначення і граничні умови	A.2.1.1	Notations and boundary conditions	57
A.2.1.2	Геометрія і зміщення стиків	A.2.1.2	Geometry and joint offsets	57
A.2.2	Меридіональний (осьовий) стиск	A.2.2	Meridional (axial) compression	58
A.2.3	Кільцевий стиск (обруч)	A.2.3	Circumferential (hoop) compression	58
A.2.3.1	Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості	A.2.3.1	Critical circumferential buckling stresses	58

A.2.3.2	Перевірка міцності втрати стійкості при кільцевому стиску	A.2.3.2	Buckling strength verification for circumferential compression	62
A.2.4	Зсув	A.2.4	Shear	63
A.2.4.1	Критичне дотичне напруження втрати стійкості	A.2.4.1	Critical shear buckling stress	63
A.2.4.2	Перевірка міцності на втрату стійкості при зсуві	A.2.4.2	Buckling strength verification for shear	64
A.3	Непідсилені циліндричні оболонки, з'єднані внапуск	A.3	Unstiffened lap jointed cylindrical shells	64
A.3.1	Загальні положення	A.3.1	General	64
A.3.1.1	Визначення	A.3.1.1	Definitions	64
A.3.1.2	Геометрія та результуючі напруження	A.3.1.2	Geometry and stress resultants	64
A.3.2	Меридіональний (осьовий) стиск	A.3.2	Meridional (axial) compression	65
A.3.3	Кільцевий стиск (обруч)	A.3.3	Circumferential (hoop) compression	65
A.3.4	Зсув	A.3.4	Shear	66
A.4	Непідсилені конічні оболонки	A.4	Unstiffened conical shells	66
A.4.1	Загальні положення	A.4.1	General	66
A.4.1.1	Позначення	A.4.1.1	Notation	66
A.4.1.2	Граничні умови	A.4.1.2	Boundary conditions	66
A.4.1.3	Геометрія	A.4.1.3	Geometry	67
A.4.2	Розрахункові критичні напруження при втраті стійкості	A.4.2	Design buckling stresses	67
A.4.2.1	Еквівалентний циліндр	A.4.2.1	Equivalent cylinder	67
A.4.3	Перевірка міцності при втраті стійкості	A.4.3	Buckling strength verification	68
A.4.3.1	Меридіональний стиск	A.4.3.1	Meridional compression	68
A.4.3.2	Кільцевий стиск (обруч)	A.4.3.2	Circumferential (hoop) compression	68
A.4.3.3	Зсув і рівномірне кручення	A.4.3.3	Shear and uniform torsion	69
A.5	Підсилені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки	A.5	Stiffened cylindrical shells of constant wall thickness	69
A.5.1	Загальні положення	A.5.1	General	69
A.5.2	Ізотропні стінки з меридіональним підсиленням	A.5.2	Isotropic walls with meridional stiffeners	70
A.5.2.1	Загальні положення	A.5.2.1	General	70
A.5.2.2	Меридіональний (осьовий) стиск	A.5.2.2	Meridional (axial) compression	70
A.5.2.3	Кільцевий стиск (обруч)	A.5.2.3	Circumferential (hoop) compression	71
A.5.2.4	Зсув	A.5.2.4	Shear	71
A.5.3	Ізотропні стінки з кільцевими елементами жорсткості	A.5.3	Isotropic walls with circumferential stiffeners	72
A.5.4	Кільцево гофровані стінки з меридіональними елементами жорсткості	A.5.4	Circumferentially corrugated walls with meridional stiffeners	73
A.5.4.1	Загальні положення	A.5.4.1	General	73
A.5.4.2	Осьовий стиск	A.5.4.2	Axial compression	74
A.5.4.3	Підсилені стінки, в яких осьовий стиск сприймається виключно елементами жорсткості	A.5.4.3	Stiffened wall treated as carrying axial compression only in the stiffeners	76
A.5.4.4	Кільцевий стиск (обруч)	A.5.4.4	Circumferential (hoop) compression	78
A.5.5	Стінки з осьовим гофруванням і кільцями жорсткості	A.5.5	Axially corrugated walls with ring stiffeners	78
A.5.5.1	Загальні положення	A.5.5.1	General	78

A.5.5.2	Осьовий стиск	A.5.5.2	Axial compression	79
A.5.5.3	Кільцевий стиск (обруч)	A.5.5.3	Circumferential (hoop) compression	79
A.5.6	Підсилена стінка, що розглядається як ортотропна оболонка	A.5.6	Stiffened wall treated as an orthotropic shell	80
A.5.6.1	Загальні положення	A.5.6.1	General	80
A.5.6.2	Осьовий стиск	A.5.6.2	Axial compression	80
A.5.6.3	Кільцевий стиск (обруч)	A.5.6.3	Circumferential (hoop) compression	83
A.5.6.4	Зсув	A.5.6.4	Shear	84
A.5.7	Еквівалентні ортотропні властивості гофрованого настилу	A.5.7	Equivalent orthotropic properties of corrugated sheeting	84
A.6	Непідсилені сферичні оболонки під дією рівномірно розподіленого кільцевого стиску	A.6	Unstiffened spherical shells under uniform circumferential compression	86
A.6.1	Позначення та граничні умови	A.6.1	Notations and boundary conditions	86
A.6.2	Критичні напруження при втраті стійкості	A.6.2	Critical buckling stresses	87
A.6.3	Кільцеві коефіцієнти втрати стійкості	A.6.3	Circumferential buckling parameter	87
Додаток В [довідковий] – Вирази для розрахунку на стійкість тороконічних і торосферичних оболонок		Annex B [informative] - Expressions for buckling analysis of toriconical and torispherical shells		89
V.1	Загальні положення	V.1	General	89
V.2	Позначення та граничні умови	V.2	Notations and boundary conditions	89
V.3	Зовнішній тиск	V.3	External pressure	90
V.3.1	Критичне значення зовнішнього тиску	V.3.1	Critical external pressure	90
V.3.2	Граничний зовнішній тиск з умов рівномірно розподіленого змінання	V.3.2	Uniform squash limit external pressure	91
V.3.3	Коефіцієнт втрати стійкості під дією зовнішнього тиску	V.3.3	External pressure buckling parameter	92
V.4	Внутрішній тиск	V.4	Internal pressure	93
V.4.1	Критичне значення внутрішнього тиску	V.4.1	Critical internal pressure	93
V.4.2	Граничний внутрішній тиск з умов рівномірно розподіленого змінання	V.4.2	Uniform squash limit internal pressure	94
V.4.3	Коефіцієнт втрати стійкості під дією внутрішнього тиску	V.4.3	Internal pressure buckling parameter	95
Додаток НА (довідковий)		Annex NA (informative)		97
Технічна поправка		Technical amendment		99

Вступ

Даний документ (EN 1999-1-5:2007) був підготовлений Технічним Комітетом CEN/TC 250 “Будівельні Єврокоди”, секретаріат якого підтримується BSI.

Цьому Європейському стандарту буде наданий статус національного з публікацією ідентичного тексту або схваленням не пізніше серпня 2007 року і при скасуванні конфлікуючих національних стандартів не пізніше березня 2010 року.

CEN/TC 250 відповідальний за всі Будівельні Єврокоди.

У відповідності з внутрішніми постановами CEN/CENELEC цей Європейський стандарт зобов’язані прийняти національні органи зі стандартизації таких країн: Австрія, Бельгія, Болгарія, Великобританія, Венгрія, Греція, Данія, Естонія, Ісландія, Іспанія, Ірландія, Італія, Кіпр, Латвія, Литва, Люксембург, Мальта, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Польща, Португалія, Румунія, Словаччина, Словенія, Угорщина, Фінляндія, Франція, Чеська Республіка, Швеція та Швейцарія

Foreword

This European Standard (EN 1999-1-5:2007) has been prepared by Technical Committee CEN/TC250 «Structural Eurocodes», the secretariat of which is held by BSI.

This European Standard shall be given the status of a national standard, either by publication of an identical text or by endorsement, at the latest by August 2007, and conflicting national standards shall be withdrawn at the latest by March 2010.

CEN/TC 250 is responsible for all Structural Eurocodes.

According to the CEN/CENELEC Internal Regulations, the national standards organizations of the following countries are bound to implement this European Standard: Austria, Bulgaria, Belgium, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italia, Latvia, Lithuania, Luxemburg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ЄВРОКОД 9. ПРОЕКТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЧАСТИНА 1-5. КОНСТРУКЦІЇ ОБОЛОНОК

ЕВРОКОД 9. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЧАСТЬ 1-5. КОНСТРУКЦИИ ОБОЛОЧЕК

UROCODE 9: DESIGN OF ALUMINIUM STRUCTURES PART 1-5: SHELL STRUCTURES

Чинний від _____

Основи програми Єврокодів

У 1975 році Комісія Європейської Спільноти вирішила розпочати програму дій у галузі будівництва на підставі статті 95 Договору. Метою програми було усунення технічних перешкод для торгівлі і узгодження технічних умов.

В рамках цієї програми дій Комісія взяла на себе ініціативу встановити систему узгоджених технічних правил для проектування будівель і споруд, які на першій стадії мали слугувати альтернативою чинним національним правилам Держав-членів, а зрештою мали замінити їх.

Упродовж п'ятнадцяти років Комісія за допомогою Робочого комітету, до складу якого входили представники Держав-членів, вела розробку програми Єврокодів, яка призвела до публікації комплексу першого покоління Європейських кодів у 80-тих роках.

Background of the Eurocode programme

In 1975, the Commission of the European Community decided on an action programme in the field of construction, based on article 95 of the Treaty. The objective of the programme was the elimination of technical obstacles to trade and the harmonisation of technical specifications.

Within this action programme, the Commission took the initiative to establish a set of harmonised technical rules for the design of construction works, which, in a first stage, would serve as an alternative to the national rules in force in the Member States and, ultimately, would replace them.

For fifteen years, the Commission, with the help of a Steering Committee with Representatives of Member States, conducted the development of the Eurocodes programme, which led to the first generation of European codes in the 1980s.

В 1989 році Комісія та держави, члени ЕУ (Європейської Спільноти) та ЕФТА (Європейської Асоціації Вільної Торговлі) на основі угоди¹ між Комісією та СЕН (Європейським Комітетом із Стандартизації) вирішили передати підготовку та публікацію Єврокодів СЕН за допомогою серії Мандатів, що в результаті надало б Єврокодам в майбутньому статусу Європейського Стандарту (EN). Це пов'язує Єврокоди з положеннями Директив Ради і Рішень Комісії щодо Європейських стандартів (тобто Директиви Ради 89/106/ЕЕС щодо будівельних виробів - СРД - та Директив Ради 93/37/ЕЕС, 92/50/ЕЕС та 89/440/ЕЕС відносно суспільних робіт та послуг і еквівалентних директив ЕФТА, започаткованих, щоб допомогти заснуванню внутрішнього ринку).

Структурна програма Єврокодів включає такі стандарти, які в основному складаються 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.

Стандарти Єврокодів визнають відповідальність регуляторних органів держав-членів та захищають їх право на

¹ Угода між Комісією Європейського Співтовариства та Європейським комітетом зі стандартизації (СЕН) з проведення робіт над європейськими нормами промислового і цивільного будівництва, Єврокодами (BC/CEN/03/89).

In 1989, the Commission and the Member States of the EU and EFTA decided, on the basis of an agreement¹ between the Commission and CEN, to transfer the preparation and the publication of the Eurocodes to the CEN through a series of Mandates, in order to provide them with a future status of European Standard (EN). This links *de facto* the Eurocodes with the provisions of all the Council's Directives and/or Commission's Decisions dealing with European standards (e.g. the Council Directive 89/106/EEC on construction products – CPD – and Council Directives 93/37/EEC, 92/50/EEC and 89/440/EEC on public works and services and equivalent EFTA Directives initiated in pursuit of setting up the internal market).

The Structural Eurocode programme comprises the following standards generally consisting of a number of Parts:

EN 1990 Eurocode 0: Basis of Structural Design

EN 1991 Eurocode 1: Actions on structures

EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures

EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures

EN 1994 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures

EN 1995 Eurocode 5: Design of timber structures

EN 1996 Eurocode 6: Design of masonry structures

EN 1997 Eurocode 7: Geotechnical design

EN 1998 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance

EN 1999 Eurocode 9: Design of aluminium structures.

Eurocode standards recognise the responsibility of regulatory authorities in each Member State and have safeguarded

¹ Agreement between the Commission of the European Communities and the European Committee for Standardisation (CEN) concerning the work on EUROCODES for the design of building and civil engineering works (BC/CEN/03/89).

призначення величин, які пов'язані з регулюванням питань безпеки на національному рівні там, де вони відрізняються від країни до країни.

Статус та галузь застосування Єврокодів

Держави-члени EU та EFTA визнають те, що Єврокоди діють як еталонні документи для таких цілей:

- як засіб довести відповідність будівель і споруд основним вимогам Директиви Ради 89/106/ЕЕС, зокрема основній вимозі №1- Механічна стійкість та стабільність і основній вимозі №2 – Пожежна безпека;

– як основа для укладання контрактів для будівель і споруд та пов'язаних з ними інженерних послуг;

– як основа для складання узгоджених технічних специфікацій для будівельних виробів (ENs та ETAs).

Єврокоди, оскільки вони безпосередньо відносяться до будівельних споруд, мають прямий зв'язок з Тлумачними документами² розділі 12 CPD, незважаючи на те, що вони мають різну природу з гармонізованими стандартами на вироби³.

² Згідно статті 3.3 документа CPD, суттєві вимоги (essential requirements, або ER) повинні бути конкретизовані у пояснювальних документах, щоб встановити належний зв'язок між такими вимогами та дорученнями-мандатами на розробку документів hENs and ETAGs/ETAs.

³ Відповідно до Ст. 12 CPD, Тлумачні документи мають:

a) надати конкретну форму Основним вимогам, узгодивши термінологію і технічні засади, і вказавши класи або рівні для кожної вимоги, де це необхідно;

b) вказати методи встановлення співвідношення між цими класами або рівнями вимог з технічними вимогами, наприклад, методи розрахунку і перевірки, технічні правила проектування, і т. ін.;

c) слугувати як рекомендація для встановлення узгоджених стандартів і настанов для Європейського технічного ухвалення.

Єврокоди de facto грають подібну роль у сфері ER 1 і частині ER 2.

their right to determine values related to regulatory safety matters at national level where these continue to vary from State to State.

Status and field of application of Eurocodes

The Member States of the EU and EFTA recognise that Eurocodes serve as reference documents for the following purposes:

– as a means to prove compliance of building and civil engineering works with the essential requirements of Council Directive 89/106/ EEC, particularly Essential Requirement № 1 – Mechanical resistance and stability – and Essential Requirement № 2 – Safety in case of fire;

– as a basis for specifying contracts for construction works and related engineering services;

– as a framework for drawing up harmonised technical specifications for construction products (ENs and ETAs).

The Eurocodes, as far as they concern the construction works themselves, have a direct relationship with the Interpretative Documents² referred to in Article 12 of the CPD, although they are of a different nature from harmonised product standards³.

² According to Art. 3.3 of the CPD, the essential requirements (ERs) shall be given concrete form in interpretative documents for the creation of the necessary links between the essential requirements and the mandates for harmonised ENs and ETAGs/ETAs.

³ According to Art. 12 of the CPD the interpretative documents shall :

a) give concrete form to the essential requirements by harmonising the terminology and the technical bases and indicating classes or levels for each requirement where necessary;

b) indicate methods of correlating these classes or levels of requirement with the technical specifications, e.g. methods of calculation and of proof, technical rules for project design, etc.;

c) serve as a reference for the establishment of harmonised standards and guidelines for European technical approvals.

The Eurocodes, de facto, play a similar role in the field of the ER 1 and a part of ER 2.

Таким чином, технічні аспекти, які впливають з Єврокодів для будівель і споруд повинні в повній мірі бути розглянутими Технічними Комітетами CEN та/чи робочими групами EOTA, які розробляють стандарти на будівельні вироби, з позицій досягнення повної сумісності технічних специфікацій з Єврокодами.

Стандарти Єврокодів надають загальні правила проектування для практичного використання всіх конструкції та її компонентів, як традиційного так і інноваційного характеру. Унікальні форми конструкції або умови проектування не охоплюються, і в таких випадках проектувальнику потрібен додатковий експертний розгляд.

Національні стандарти, що впроваджують Єврокоди

Національні стандарти, що впроваджують Єврокоди, завжди включають повний текст Єврокоду (включаючи всі додатки) виданий CEN, якому можуть передувати Національний титульний лист та Національна передмова, а також може супроводжуватися Національним додатком.

Національний додаток може включати інформацію відносно тих параметрів, які залишилися відкритими в Єврокодах для національного вибору, відомі як Національно визначені параметри, для використання при проектуванні будівель та інженерних споруд, що будуть зведені у конкретній країні, а саме:

- значення часткових коефіцієнтів надійності та/або класифікацію випадків, для яких Єврокод регламентує використання альтернатив;
- значення, які слід використовувати там, де в Єврокодi наведено тільки позначення;
- географічні та кліматичні дані, характерні для конкретної держави-учасниці, наприклад, карта снігового районування;
- конкретні методики для тих випадків, коли Єврокод регламентує використання альтернатив;

Therefore, technical aspects arising from the Eurocodes work need to be adequately considered by CEN Technical Committees and/or EOTA Working Groups working on product standards with a view to achieving a full compatibility of these technical specifications with the Eurocodes.

The Eurocode standards provide common structural design rules for everyday use for the design of whole structures and component products of both a traditional and an innovative nature. Unusual forms of construction or design conditions are not specifically covered and additional expert consideration will be required by the designer in such cases.

National Standards implementing Eurocodes

The National Standards implementing Eurocodes will comprise the full text of the Eurocode (including any annexes), as published by CEN, which may be preceded by a National title page and National foreword, and may be followed by a National annex [informative].

The National Annex (informative) may only contain information on those parameters which are left open in the Eurocode for national choice, known as Nationally Determined Parameters, to be used for the design of buildings and civil engineering works to be constructed in the country concerned, i.e.:

- values for partial factors and/or classes where alternatives are given in the Eurocode;
- values to be used where a symbol only is given in the Eurocode;
- geographical and climatic data specific to the Member State, e.g. snow map;
- the procedure to be used where alternative procedures are given in the Eurocode;

– посилання на додаткову інформацію, яка не суперечить нормативним вимогам і допомагає у користуванні Єврокодами.

Зв'язки між Єврокодами та гармонізованими технічними специфікаціями (ENs and ETAs) для виробів

Необхідна узгодженість між гармонізованими технічними специфікаціями для будівельних виробів та технічними правилами для будівель і споруд⁴. Крім того, повна інформація, яка супроводжує маркування CE будівельних виробів і має відношення до Єврокодів, повинна чітко зазначати, які Національно визначені параметри були прийняті до уваги.

Національний Додаток до EN 1999-1-5

Цей стандарт надає альтернативні процедури, величини і рекомендації для класів з примітками, які вказують місце, де необхідно зробити національні вибір. Таким чином, Національний стандарт, який імплементує EN 1999-1-5 повинен мати Національний додаток, який включав би усі Національно визначені параметри, які використовуються при проектуванні будівель та цивільних споруд, які будуть побудовані у відповідній країні.

Національним вибором дозволено ввійти до EN 1999-1-5 за допомогою:

- 2.1 (3)
- 2.1 (4)

¹ Див. Ст. 3.3 і Ст.12 CPD, а також 4.2, 4.3.1, 4.3.2 ID 1.

– references to non-contradictory complementary information to assist the user to apply the Eurocode.

Links between Eurocodes and harmonised technical specifications (ENs and ETAs) for products

There is a need for consistency between the harmonised technical specifications for construction products and the technical rules for works⁴. Furthermore, all the information accompanying the CE Marking of the construction products, which refer to Eurocodes, shall clearly mention which Nationally Determined Parameters have been taken into account.

National annex for EN 1999-1-5

This standard gives alternative procedures, values and recommendations with notes indicating where national choices may have to be made. Therefore the National Standard implementing EN 1999-1-5 should have a National Annex containing all Nationally Determined Parameters to be used for the design of steel structures to be constructed in the relevant country.

National choice is allowed in EN 1999-1-5 through clauses:

- 2.1 (3)
- 2.1 (4)

⁴ See Art.3.3 and Art.12 of the CPD, as well as 4.2, 4.3.1, 4.3.2 and 5.2 of ID 1.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Галузь застосування

1.1.1 Галузь застосування EN 1999

(1)P Стандарт EN 1999 регламентує питання проектування алюмінієвих конструкцій будівель та споруд цивільного призначення. Він реалізує принципи і нормативні вимоги до безпеки та експлуатаційної придатності конструкцій, основні положення проектування, розрахунку і перевірки будівельних конструкцій, викладені у документі EN 1990 – Основи проектування конструкцій.

(2)P Стандарт EN 1999 висуває вимоги тільки до опору, експлуатаційної придатності, довговічності та вогнестійкості алюмінієвих конструкцій. Інші вимоги, наприклад, ті, що стосуються тепло- або звукоізоляції конструкцій, у даному стандарті не розглядаються.

(3) Стандарт EN 1999 повинен використовуватися разом з наступними документами:

– EN 1990: “Основи проектування конструкцій”

– EN 1991 “Дії на конструкції”

– Європейські стандарти на вироби будівельної індустрії, які мають відношення до алюмінієвих конструкцій

– EN 1090-1: Виконання робіт зі сталевими та алюмінієвими конструкціями – ч.1. Вимоги до забезпечення відповідності стандартам елементів будівельних конструкцій⁵

– EN 1090-3: Виконання робіт зі сталевими та алюмінієвими конструкціями – ч.3, Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій⁵

(4) Стандарт EN 1999 включає п'ять частин:

EN 1999-1-1 Проектування алюмінієвих конструкцій: Частина 1-1. Загальні правила для конструкцій.

⁵ Буде опубліковано

1 GENERAL

1.1 Scope

1.1.1 Scope of EN 1999

(1)P EN 1999 applies to the design of buildings and civil engineering and structural works in aluminium. It complies with the principles and requirements for the safety and serviceability of structures, the basis of their design and verification that are given in EN 1990 – Basis of structural design.

(2)P EN 1999 is only concerned with requirements for resistance, serviceability, durability and fire resistance of aluminium structures. Other requirements, e.g. concerning thermal or sound insulation, are not considered.

(3) EN 1999 is intended to be used in conjunction with:

– EN 1990 Basis of structural design

– EN 1991 Actions on structures

– European Standards for construction products relevant for aluminium structures

– EN 1090-1 Execution of steel structures and aluminium structures – Part 1: Requirements for conformity assessment of structural components⁵

– EN 1090-3 Execution of steel structures and aluminium structures – Part 3: Technical requirements for aluminium structures⁵

(4) EN 1999 is subdivided in five parts:

EN 1999-1-1 Design of Aluminium Structures: General structural rules.

⁵To be published

EN 1999-1-2 Проектування алюмінієвих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

EN 1999-1-3 Проектування алюмінієвих конструкцій. Конструкції чутливі до витривалості.

EN 1999-1-4 Проектування алюмінієвих конструкцій. Холодноформовані листи.

EN 1999-1-5 Проектування алюмінієвих конструкцій. Конструкції оболонки.

1.1.2 Галузь застосування EN 1999-1-5

(1) EN 1999-1-5 поширюється на проектування алюмінієвих конструкцій, з елементами жорсткості чи без них, що мають форму оболонки обертання або округлого щита монококової конструкції.

(2) Для окремих питань з проектування конструкцій слід звертатись до суміжних частин EN 1999.

(3) Додаткова інформація щодо окремих типів оболонки наведена у EN 1993-1-6 та суміжних розділах, а саме:

- Розділ 3-1 для башт та щогол;
- Розділ 3-2 для димарів;
- Розділ 4-1 для бункерів;
- Розділ 4-2 для резервуарів;
- Розділ 4-3 для трубопроводів.

(4) Вимоги EN 1999-1-5 стосуються вісесиметричних оболонки (циліндрів, конусів, сфер), кільцевих і кругових пластин, а також кільцевих перерізів балок і стрингерів, у випадку коли вони є частиною цілісної конструкції.

(5) В EN 1999-1-5 не розглядаються в повній мірі окремі панелі оболонки (циліндричні, конічні або сферичні). Тим не менше, до них також можна застосувати вищезазначені норми, обравши правильні граничні умови.

(6) Типи стінок оболонки, що розглядаються в EN 1999-1-5 (див. Рис.1.1):

- стінка оболонки з листового прокату, далі "ізотропна";
- стінка оболонки утворена з'єднанням внапуск окремих пластин, далі "зі стиками внапуск";

EN 1999-1-2 Design of Aluminium Structures: Structural fire design.

EN 1999-1-3 Design of Aluminium Structures: Structures susceptible to fatigue.

EN 1999-1-4 Design of Aluminium Structures: Cold-formed structural sheeting.

EN 1999-1-5 Design of Aluminium Structures: Shell structures.

1.1.2 Scope of EN 1999-1-5

(1) EN 1999-1-5 applies to the structural design of aluminium structures, stiffened and unstiffened, that have the form of a shell of revolution or of a round panel in monocoque structures.

(2) The relevant parts of EN 1999 should be followed for specific application rules for structural design.

(3) Supplementary information for certain types of shells are given in EN 1993-1-6 and the relevant application parts which include:

- Part 3-1 for towers and masts;
- Part 3-2 for chimneys;
- Part 4-1 for silos;
- Part 4-2 for tanks;
- Part 4-3 for pipelines.

(4) The provisions in EN 1999-1-5 apply to axisymmetric shells (cylinders, cones, spheres) and associated circular or annular plates and beam section rings and stringer stiffeners where they form part of the complete structure.

(5) Single shell panels (cylindrical, conical or spherical) are not explicitly covered by EN 1999-1-5. However, the provisions can be applicable if the appropriate boundary conditions are duly taken into account.

(6) Types of shell walls covered in EN 1999-1-5 can be, see Figure 1.1:

- shell wall constructed from flat rolled sheet, termed 'isotropic';
- shell wall with lap joints formed by connecting adjacent plates with overlapping sections, termed 'lapjointed';

-стінка оболонки з елементами жорсткості по зовнішній поверхні, далі “із зовнішніми елементами жорсткості”, незалежно від кроку елементів жорсткості;

-shell wall with stiffeners attached to the outside, termed ‘externally stiffened’ irrespective of the spacing of the stiffeners;

-стінка оболонки, гофрована в меридіональному напрямку, далі “з осьовим гофруванням”;

-shell wall with the corrugations running up the meridian, termed ‘axially corrugated’;

-стінка оболонки з гофрованих листів, розташованих гофрами у кільцевому напрямку, далі “з кільцевим гофруванням”.

-shell wall constructed from corrugated sheets with the corrugations running around the shell circumference, termed ‘circumferentially corrugated’.

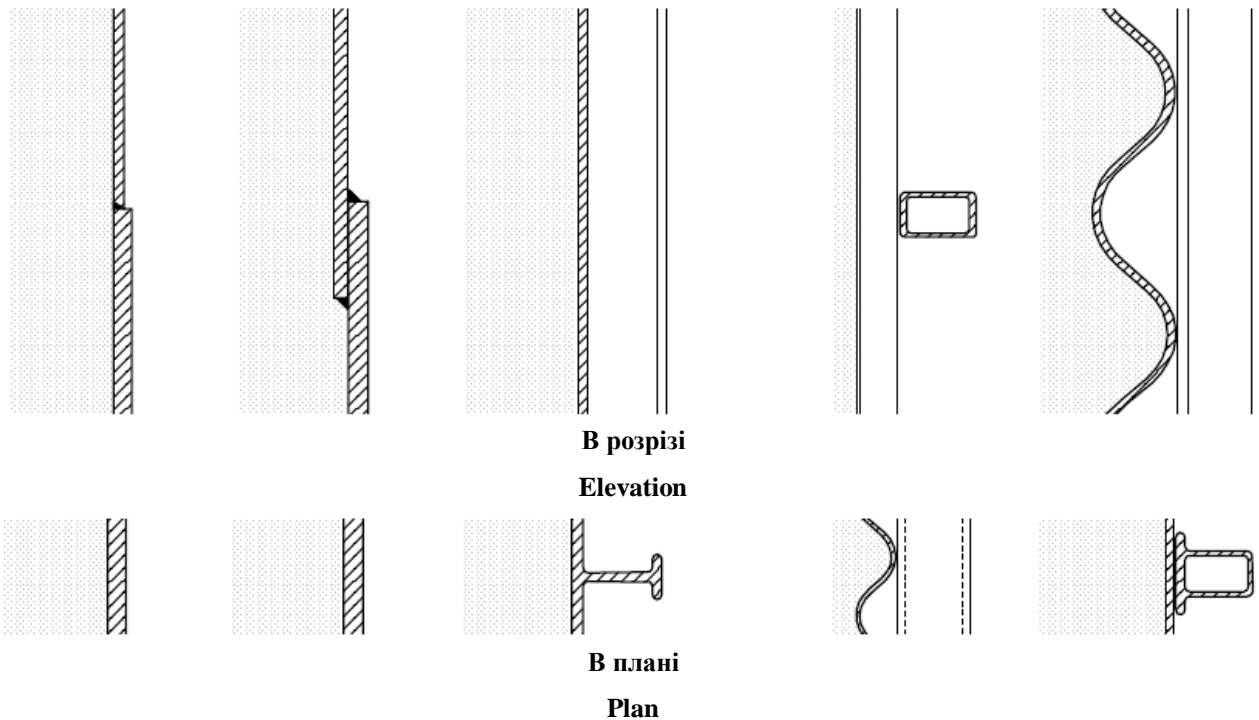


Рисунок 1.1 – Зображення циліндричних оболонок
Figure 1.1 – Illustration of cylindrical shell forms

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

(7) The provisions of EN 1999-1-5 are intended to be applied within the temperature range defined in EN 1999-1-1. The maximum temperature is restricted so that the influence of creep can be neglected. For structures subject to elevated temperatures associated with fire see EN 1999-1-2.

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

(8) EN 1999-1-5 does not cover the aspects of leakage.

1.2 Нормативні посилання

(1) EN 1999-1-5 містить датовані чи недатовані посилання з положеннями інших публікацій. Ці нормативні посилання наведені у відповідних місцях тексту та внесені до списку публікацій. Для датованих посилань наступні поправки або зміни в будь-яких з цих публікацій приймаються цим Європейським стандартом тільки у разі, коли ці поправки або зміни зареєстровані. Для недатованих посилань застосовується остання редакція публікації (включаючи поправки).

EN 1090-1: Виконання робіт зі сталевими та алюмінієвими конструкціями – ч.1: Вимоги до забезпечення відповідності стандартам елементів будівельних конструкцій⁵

EN 1090-3: Виконання робіт зі сталевими та алюмінієвими конструкціями – ч.3: Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій⁵

EN 1990 Основи проектування конструкцій

EN 1991 Єврокод 1. Дії на конструкції– усі частини

EN 1993-1-6 Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-6. Конструкції оболонки

EN 1993-3-2 Проектування сталевих конструкцій. Частина 3-2. Димові труби

EN 1993-4-1 Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-1. Силоси

EN 1993-4-2 Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-2. Резервуари

EN 1993-4-3 Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-3. Трубопроводи

EN 1999-1-1 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-1. загальні правила для конструкцій.

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, чутливі до витривалості

EN 1999-1-4 Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-4.

1.2 Normative references

(1) EN 1999-1-5 incorporates by dated or undated reference, provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text and the publications are listed hereafter. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this European Standard only if incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies (including amendments).

EN 1090-1 Execution of steel structures and aluminium structures – Part 1: Requirements for conformity assessment of structural components⁵

EN 1090-3 Execution of steel structures and aluminium structures – Part 3: Technical requirements for aluminium structures⁵

EN 1990 Basis of structural design

EN 1991 Actions on structures – All parts

EN 1993-1-6 Design of steel structures - Part 1-6: Shell structures

EN 1993-3-2 Design of steel structures - Part 3-2: Chimneys

EN 1993-4-1 Design of steel structures - Part 4-1: Silos

EN 1993-4-2 Design of steel structures - Part 4-2: Tanks

EN 1993-4-3 Design of steel structures - Part 4-3: Pipelines

EN 1999-1-1 Design of aluminium structures - Part 1-1: General rules

EN 1999-1-2 Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design

EN 1999-1-3 Design of aluminium structures - Part 1-3: Structures susceptible to fatigue

EN 1999-1-4 Design of aluminium structures

Холодноформовані листи

1.3 Терміни та визначення

(1) Додатково до EN 1999-1-1, у EN 1999-1-5 використовуються наступні позначення:

1.3.1 *Форми та геометрія конструкцій*

1.3.1.1 *оболонка*

Тонкостінна конструкція, утворена криволінійною поверхнею, яка має товщину, що вимірюється перпендикулярно до поверхні, малу у порівнянні з іншими розмірами. Оболонка сприймає навантаження, в основному, за рахунок мембранних зусиль. Серединна поверхня у кожній точці може мати скінченні радіуси кривизни або нескінченний радіус кривизни в одному напрямку, наприклад, як у випадку циліндричної оболонки.

У EN 1999-1-5 оболонка визначається як конструкція або елемент конструкції, утворений зігнутим тонким листом.

1.3.1.2 *оболонка обертання*

Оболонка, яка складається з декількох частин, кожна з яких є замкнутою вісесиметричною оболонкою.

1.3.1.3 *замкнута вісесиметрична оболонка*

Оболонка, форма якої визначається за допомогою повороту меридіональної твірної навколо однієї осі на кут 2π радіан. Така оболонка може мати будь-яку довжину.

1.3.1.4 *сегмент оболонки*

Частина оболонки обертання, що має конкретну оболонкову форму та постійну товщину стінки: циліндр, зрізаний конус, сферичний сегмент, кільцева плита або фігура іншої форми.

1.3.1.5 *панель оболонки*

Незамкнута вісесиметрична оболонка: форма оболонки визначається поворотом твірної навколо осі на кут, менший ніж 2π радіан.

1.3.1.6 *серединна поверхня*

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

- Part 1-4: Cold-formed structural sheeting

1.3 Terms and definitions

(1) Supplementary to EN 1999-1-1, for the purposes of this part, the following definitions apply:

1.3.1 *Structural forms and geometry*

1.3.1.1 *shell*

A thin-walled body shaped as a curved surface with the thickness measured normal to the surface being small compared to the dimensions in the other directions. A shell carries its loads mainly by membrane forces. The middle surface may have finite radius of curvature at each point or infinite curvature in one direction, e.g. cylindrical shell.

In EN 1999-1-5, a shell is a structure or a structural component formed from curved sheets or extrusions.

1.3.1.2 *shell of revolution*

A shell composed of a number of parts, each of which is a complete axisymmetric shell.

1.3.1.3 *complete axisymmetric shell*

A shell whose form is defined by a meridional generator line rotated around a single axis through 2π radians. The shell can be of any length.

1.3.1.4 *shell segment*

A part of shell of revolution in the form of a defined shell geometry with a constant wall thickness: a cylinder, conical frustum, spherical frustum, annular plate or other form.

1.3.1.5 *shell panel*

An incomplete axisymmetric shell: the shell form is defined by a rotation of the generator about the axis through less than 2π radians.

1.3.1.6 *middle surface*

The surface that lies midway between the inside and outside surfaces of the shell at

поверхніми оболонки. Якщо оболонка підкріплена лише на одній поверхні, за базову серединну поверхню приймається серединна поверхня викривленої оболонкової пластини. Серединна поверхня є базовою поверхнею для розрахунку і може мати розриви при зміні товщини або в місцях з'єднання оболонок, внаслідок чого виникає ексцентриситет, який може суттєво впливати на реакцію оболонки.

1.3.1.7 стик

Місце, в якому сходяться два або більше сегментів оболонки. Воно може включати елемент жорсткості або ні. Колова лінія, по якій елемент жорсткості кріпиться до оболонки, можна вважати стиком.

1.3.1.8 стрингер

Місцевий елемент жорсткості, розташований вздовж твірної оболонки обертання. Використовується для збільшення стійкості або для сприймання місцевих навантажень. Він не призначений для забезпечення основного опору згину від поперечного навантаження

1.3.1.9 ребро

Місцевий елемент, твірна оболонки обертання, що забезпечує первинне сприйняття згинаючих навантажень вздовж меридіана оболонки. Використовується для передачі або розподілу поперечних навантажень при згині.

1.3.1.10 кільце жорсткості

Місцевий елемент жорсткості, який проходить навколо окружності оболонки обертання у заданій точці меридіану. Допускається, що у площині меридіану оболонки немає жорсткості. Цей елемент потрібен для підвищення стійкості або для сприйняття вісесиметричних місцевих навантажень, які діють у площині кільця за допомогою вісесиметричних нормальних сил. Він не застосовується для забезпечення первинного опору згинанню.

1.3.1.11 опорне кільце

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

every point. If the shell is stiffened on only one surface, the reference middle surface is still taken as the middle surface of the curved shell plate. The middle surface is the reference surface for analysis, and can be discontinuous at changes of thickness or shell junctions, leading to eccentricities that are important to the shell response.

1.3.1.7 junction

The point at which two or more shell segments meet: it can include a stiffener or not: the point of attachment of a ring stiffener to the shell may be treated as a junction.

1.3.1.8 stringer stiffener

A local stiffening member that follows the meridian of the shell, representing a generator of the shell of revolution. It is provided to increase the stability, or to assist with the introduction of local loads. It is not intended to provide a primary resistance for bending due to transverse loads.

1.3.1.9 rib

A local member that provides a primary load carrying path for bending down the meridian of the shell, representing a generator of the shell of revolution. It is used to transfer or distribute transverse loads by bending.

1.3.1.10 ring stiffener

A local stiffening member that passes around the circumference of the shell of revolution at a given point on the meridian. It is assumed to have no stiffness in the meridional plane of the shell. It is provided to increase the stability or to introduce axisymmetric local loads acting in the plane of the ring by a state of axisymmetric normal forces. It is not intended to provide primary resistance for bending.

1.3.1.11 base ring

A structural member that passes around the circumference of the shell of revolution at the base and provides means of attachment of the shell to a foundation or other element. It is

конструкції. Воно призначене для практичного забезпечення передбачених граничних умов.

1.3.2 *Окремі визначення щодо розрахуку на втрату стійкості*

1.3.2.1 *критичне навантаження при втраті стійкості*

Найменша біфуркація або граничне навантаження, визначене при допущенні ідеалізованих умов пружної роботи матеріалу, ідеальної геометрії, ідеального прикладання навантаження, ідеальної опори, ізотропності матеріалу і відсутності залишкових напружень (аналіз LBA).

1.3.2.2 *критичні напруження при втраті стійкості*

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

1.3.2.3 *характеристичне напруження при втраті стійкості*

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

1.3.2.4 *розрахунковий опір втраті стійкості*

Розрахункове значення напруження при втраті стійкості, яке отримується за допомогою ділення характеристичного напруження при втраті стійкості на частковий коефіцієнт опору.

1.3.2.5 *основне значення напруження*

Значення напруження в неоднорідному полі напружень, що використовується для характеризування величин напруження при оцінці граничного стану за втратою стійкості.

1.3.2.6 *клас допуску*

Клас вимог до геометричних допусків, що використовується для виконання робіт.

Примітка. Геометричні допуски для виконання робіт відносяться до виготовлення елементів та робіт з елементами на будівельному майданчику.

needed to ensure that the assumed boundary conditions are achieved in practice.

1.3.2 *Special definitions for buckling calculations*

1.3.2.1 *critical buckling load*

The smallest bifurcation or limit load determined assuming the idealised conditions of elastic material behaviour, perfect geometry, perfect load application, perfect support, material isotropy and absence of residual stresses (LBA analysis).

1.3.2.2 *critical buckling stress*

The nominal membrane stress associated with the elastic critical buckling load.

1.3.2.3 *characteristic buckling stress*

The nominal membrane stress associated with buckling in the presence of inelastic material behaviour and of geometrical and structural imperfections.

1.3.2.4 *design buckling stress*

The design value of the buckling stress, obtained by dividing the characteristic buckling stress by the partial factor for resistance.

1.3.2.5 *key value of the stress*

The value of stress in a non-uniform stress field that is used to characterise the stress magnitude in the buckling limit state assessment.

1.3.2.6 *tolerance class*

The class of requirements to geometrical tolerances for work execution.

NOTE: Geometrical tolerances for work execution are built up from fabrication of components and execution of the components at site.

1.4 Позначення

(1) Додатково до вже наведених у EN 1999-1-1, тут використовуються наступні умовні позначення:

(2) Система координат (див. Рисунок 1.2):

r радіальна координата, перпендикулярна до осі обертання;

x меридіональна координата;

z осьова координата;

θ кільцева координата;

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

(3) Тиск:

p_n перпендикулярний до оболонки;

p_x меридіональне поверхнєве навантаження, паралельне оболонці;

p_θ кільцеве поверхнєве навантаження, паралельне оболонці;

(4) Лінійні сили:

P_n навантаження на одиницю кола, що перпендикулярне до оболонки;

P_x навантаження на одиницю кола, що діє в меридіональному напрямі;

P_θ навантаження на одиницю кола, що діє на оболонку в кільцевому напрямі;

(5) Результуюче мембранне напруження (див. Рисунок 1.3a):

n_x результуюче меридіональне мембранне напруження;

n_θ результуюче кільцеве мембранне напруження;

$n_{x\theta}$ результуюче дотичне мембранне напруження; (див. Рисунок 1.3b)

(6) Результуюче згинальне напруження (див. Рисунок 1.3a):

m_x меридіональний згинальний момент на одиницю ширини;

m_θ кільцевий згинальний момент на

1.4 Symbols

(1) In addition to the symbols defined in EN 1999-1-1, the following are used.

(2) Coordinate system (see Figure 1.2):

r radial coordinate, normal to the axis of revolution;

x meridional coordinate;

z axial coordinate;

θ circumferential coordinate;

ϕ meridional slope: angle between axis of revolution and normal to the meridian of the shell.

(3) Pressures:

p_n normal to the shell;

p_x meridional surface loading parallel to the shell;

p_θ circumferential surface loading parallel to the shell;

(4) Line forces:

P_n load per unit circumference normal to the shell;

P_x load per unit circumference acting in the meridional direction;

P_θ load per unit circumference acting circumferentially on the shell;

(5) Membrane stress resultants (see Figure 1.3a):

n_x meridional membrane stress resultant;

n_θ circumferential membrane stress resultant;

$n_{x\theta}$ membrane shear stress resultant

(6) Bending stress resultants (see Figure 1.3b):

m_x meridional bending moment per unit width;

m_θ circumferential bending moment per

одиницю ширини;

$m_{x\theta}$ крутний момент зсуву на одиницю ширини;

q_{xn} поперечна перерізувальна сила від меридіонального згину;

$q_{\theta n}$ поперечна перерізувальна сила від кільцевого згину;

(7) Напруження:

σ_x меридіональне напруження;

σ_θ кільцеве напруження;

σ_{eq} еквівалентне напруження фон Мізеса (може набувати від'ємних значень у процесі циклічного вантаження);

$\tau, \tau_{x\theta}$ дотичне напруження в площині;

$\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ меридіональне, кільцеве поперечне дотичне напруження від згину;

(8) Переміщення:

u меридіональне переміщення;

v кільцеве переміщення;

w переміщення, перпендикулярне до поверхні оболонки;

β_ϕ меридіональний поворот (див. 5.3.3);

(9) Розміри оболонки:

d внутрішній діаметр оболонки;

L загальна довжина оболонки;

l довжина сегменту оболонки;

l_g розрахункова довжина для виміру дефектів;

$l_{g,\theta}$ розрахункова довжина для виміру дефектів у коловому напрямі;

$l_{g,w}$ розрахункова довжина для виміру дефектів у напрямі поперек зварного шва;

l_R обмеження довжини оболонки для оцінки напруження при втраті загальної стійкості;

r радіус серединної поверхні,

unit width;

$m_{x\theta}$ twisting shear moment per unit width;

q_{xn} transverse shear force associated with meridional bending;

$q_{\theta n}$ transverse shear force associated with circumferential bending.

(7) Stresses:

σ_x meridional stress;

σ_θ circumferential stress;

σ_{eq} von Mises equivalent stress (can be negative in cyclic loading conditions);

$\tau, \tau_{x\theta}$ in-plane shear stress;

$\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$ meridional, circumferential transverse shear stresses associated with bending;

(8) Displacements:

u meridional displacement;

v circumferential displacement;

w displacement normal to the shell surface,

β_ϕ meridional rotation (see 5.3.3);

(9) Shell dimensions:

d internal diameter of shell;

L total length of shell;

l length of shell segment;

l_g gauge length for measurement of imperfections;

$l_{g,\theta}$ gauge length for measurement of imperfections in circumferential direction;

$l_{g,w}$ gauge length for measurement of imperfections across welds;

l_R limited length of shell for buckling strength assessment;

r radius of the middle surface, normal to

перпендикулярний до осі обертання;

t товщина стінки оболонки;

t_{max} максимальна товщина стінки оболонки у з'єднанні;

t_{min} мінімальна товщина стінки оболонки у з'єднанні;

t_{ave} середня товщина стінки оболонки у з'єднанні;

β половина кута при вершині конуса;

the axis of revolution;

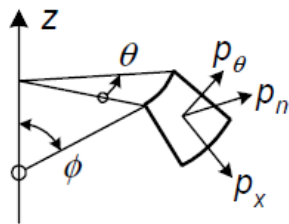
t thickness of shell wall;

t_{max} maximum thickness of shell wall at a joint;

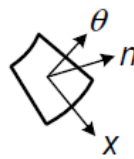
t_{min} minimum thickness of shell wall at a joint;

t_{ave} average thickness of shell wall at a joint;

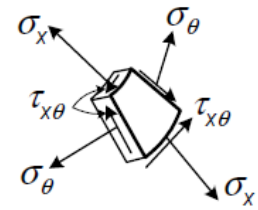
β apex half angle of cone;



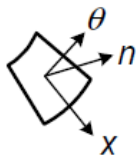
Поверхневий тиск
Surface pressures



Координати
Coordinates



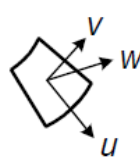
Мембранні напруження
Membrane stresses



θ = кільцеві
 θ = circumferential

n = нормальні
 n = normal

x = меридіональні
 x = meridional



Переміщення
Displacements



Поперечні дотичні напруження
Transverse shear stresses

Рисунок 1.2 – Позначення для оболонок обертання
Figure 1.2 – Symbols in shells of revolutions

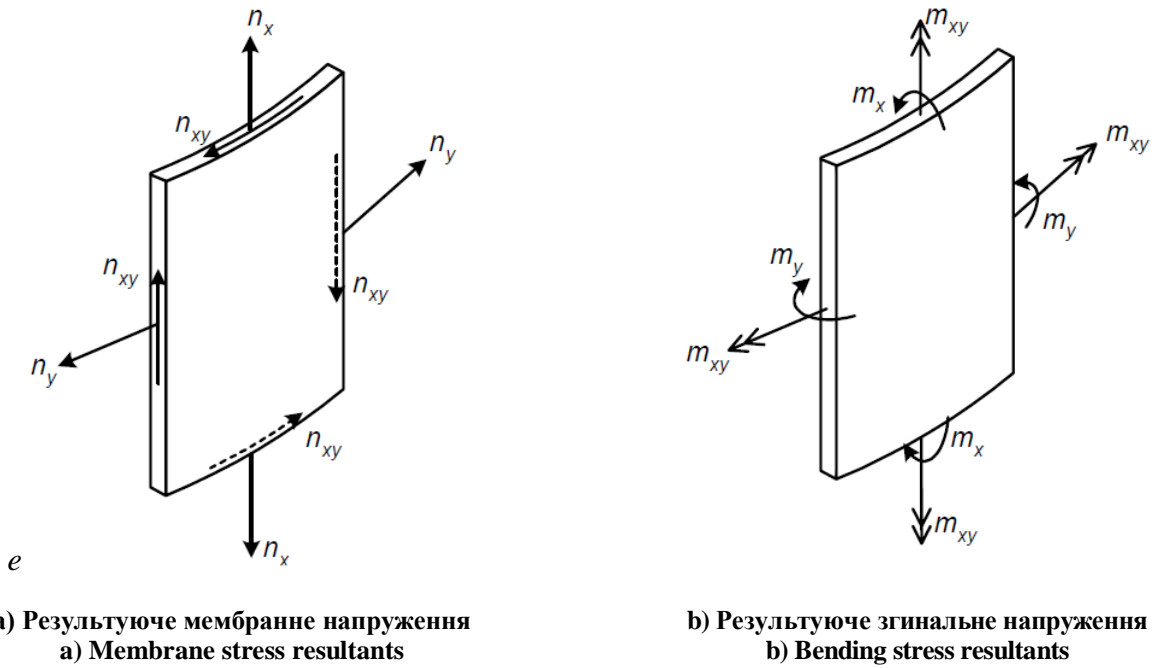


Рисунок 1.3 – Результуєчі напруження в стінці оболонки (на цьому рисунку x – меридіональний напрям, y – кільцевий)
Figure 1.3 – Stress resultants in the shell wall (In this figure x is meridional and y is circumferential)

(10) Допуски (див. 6.2.2):

e ексцентриситет між серединними поверхнями з'єднаних пластин;

U_e параметр допуску випадкового ексцентриситету;

U_r параметр допуску відхилення від кола;

U_0 вихідний параметр допуску на вм'ятини;

Δw_0 допуск, перпендикулярний до поверхні оболонки

(11) Властивості матеріалів:

f_{eq} еквівалентна міцність за Мізесом;

f_u характеристичне значення межі міцності

f_o характеристичне значення умовної границі текучості, що відповідає залишковій деформації 0,2 %

(12) Параметри оцінювання міцності:

C коефіцієнт оцінювання міцності на поздовжній згин;

C_ϕ жорсткість листів на розтяг у

(10) Tolerances (see 6.2.2):

e eccentricity between the middle surfaces of joined plates;

U_e non-intended eccentricity tolerance parameter;

U_r out-of-roundness tolerance parameter;

U_0 initial dent tolerance parameter;

Δw_0 tolerance normal to the shell surface;

(11) Properties of materials:

f_{eq} von Mises equivalent strength;

f_u characteristic value of ultimate tensile strength;

f_o characteristic value of 0,2 % proof strength;

(12) Parameters in strength assessment:

C coefficient in buckling strength assessment;

C_ϕ sheeting stretching stiffness in the axial

осьовому напрямку;

C_θ жорсткість листів на розтяг у кільцевому напрямку;

$C_{\phi\theta}$ жорсткість листів на розтяг вздовж мембрани;

D_ϕ жорсткість листів на згин у осьовому напрямку;

D_θ жорсткість листів на згин у кільцевому напрямку;

$D_{\phi\theta}$ крутильна жорсткість листів на згин при крученні;

R обчислений опір (використовується з індексами для вказівки базису);

R_{p1} опір пластичній деформації (визначається як коефіцієнт запасу міцності до розрахункових навантажень);

R_{cr} критичне пружне навантаження втрати стійкості (визначається як коефіцієнт запасу до розрахункових навантажень);

k калібрувальний коефіцієнт для нелінійних розрахунків;

$k_{(\dots)}$ ступінь взаємодії виразів у виразах взаємодії міцності на втрату стійкості;

μ коефіцієнт зміцнення сплавів у згинальних кривих для оболонок;

$a_{(\dots)}$ коефіцієнт зменшення дефектів, при оцінці міцності на втрату стійкості;

Δ діапазон параметра за наявності змінних або циклічних дій;

(13) Розрахункові та результуючі напруження;

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

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

direction;

C_θ sheeting stretching stiffness in the circumferential direction;

$C_{\phi\theta}$ sheeting stretching stiffness in membrane shear;

D_ϕ sheeting flexural rigidity in the axial direction;

D_θ sheeting flexural rigidity in the circumferential direction;

$D_{\phi\theta}$ sheeting twisting flexural rigidity in twisting;

R calculated resistance (used with subscripts to identify the basis);

R_{p1} plastic reference resistance (defined as a load factor on design loads);

R_{cr} elastic critical buckling load (defined as a load factor on design loads);

k calibration factor for nonlinear analyses;

$k_{(\dots)}$ power of interaction expressions in buckling strength interaction expressions;

μ alloy hardening parameter in buckling curves for shells;

$a_{(\dots)}$ imperfection reduction factor in buckling strength assessment;

Δ range of parameter when alternating or cyclic actions are involved;

(13) Design stresses and stress resultants

$\sigma_{x,Ed}$ design values of the buckling-relevant meridional membrane stress (positive when compression);

$\sigma_{\theta,Ed}$ design values of the buckling-relevant circumferential membrane (hoop) stress (positive when compression);

пр. ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5:201X

τ_{Ed} розрахункове значення дотичного мембранного напруження характерного для втрати стійкості;

$n_{x,Ed}$ розрахункове значення результуючого мембранного меридіонального напруження характерного для втрати стійкості (додатнє при стисненні);

$n_{\theta,Ed}$ розрахункове значення результуючого кільцевого мембранного напруження характерного для втрати стійкості (додатнє при стисненні);

$n_{x\theta,Ed}$ розрахункове значення результуючого кільцевого мембранного напруження характерного для втрати стійкості (додатнє при стисненні).

(14) Критичні напруження при втраті стійкості та напруження опору:

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

$\sigma_{\theta,cr}$ кільцеве критичне напруження при втраті стійкості;

τ_{cr} дотичне критичне напруження при втраті стійкості;

$\sigma_{x,Rd}$ меридіональне розрахункове напруження опору втраті стійкості;

$\sigma_{\theta,Rd}$ кільцеве розрахункове напруження опору втраті стійкості;

τ_{Rd} дотичне розрахункове напруження опору втраті стійкості.

(15) Визначення решти позначень наводитиметься в місці їх першої появи в документі.

1.5 Правило знаків

(1) Нижче викладене загальне правило знаків, окрім зазначеного в пункті (2)

- напрям назовні є додатнім;
- внутрішній тиск є додатнім;
- переміщення назовні є додатнім;
- розтягуючі напруження є додатніми;

τ_{Ed} design values of the buckling-relevant shear membrane stress;

$n_{x,Ed}$ design values of the buckling-relevant meridional membrane stress resultant (positive when compression);

$n_{\theta,Ed}$ design values of the buckling-relevant circumferential membrane (hoop) stress resultant (positive when compression);

$n_{x\theta,Ed}$ design values of the buckling-relevant shear membrane stress resultant.

(14) Critical buckling stresses and stress resistances:

$\sigma_{x,cr}$ meridional critical buckling stress;

$\sigma_{\theta,cr}$ circumferential critical buckling stress;

τ_{cr} shear critical buckling stress;

$\sigma_{x,Rd}$ meridional design buckling stress resistance;

$\sigma_{\theta,Rd}$ circumferential design buckling stress resistance;

τ_{Rd} shear design buckling stress resistance.

(15) Further symbols are defined where they first occur.

1.5 Sign conventions

(1) In general the sign conventions are the following, except as noted in (2)

- outward direction positive;
- internal pressure positive;
- outward displacement positive;
- tensile stresses positive;

– дотичні напруження згідно Рис. 1.2.

(2) З метою спрощення, для розрахунку на втрату стійкості додатнім прийнято вважати напруження стиску. Зовнішній та внутрішній тиск обидва приймаються додатніми.

1.6 Системи координат

(1) Загалом, для оболонкових конструкцій використовується наступна циліндрична система координат (див. Рисунок 1.4):

координата вздовж оболонки обертання	центральної осі	z
радіальна координата		r
кільцева координата		θ

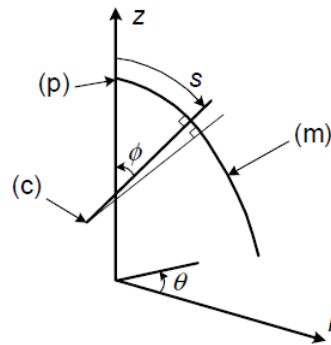
– shear stresses as shown in Figure 1.2.

(2) For simplicity, for buckling analysis, compressive stresses are treated as positive. For these cases both external pressures and internal pressures are treated as positive.

1.6 Coordinate systems

(1) In general, the convention for the global shell structure axis system is in cylindrical coordinates (see Figure 1.4) as follows:

coordinate along the central axis of a shell of revolution	z
radial coordinate	r
circumferential coordinate	θ



(p) = полюс
(p) = pole,

(m) = меридіан оболонки
(m) = shell meridian

(c) = миттєвий центр меридіональної кривизни
(c) = instantaneous centre of meridional curvature

Рисунок 1.4 – Система координат кільцевої оболонки
Figure 1.4 – Coordinate systems for a circular shell

(2) Положення щодо координат для меридіональних та кільцевих елементів, з'єднаних з оболонкою, дещо різняться.

(3) Положення щодо координат для прямолінійних елементів, з'єднаних з оболонкою в меридіональному напрямку наступні (див. Рисунок 1.5(I)):

меридіональна координата для елементів, дотичних до дна (воронки), циліндричної частини і даху x

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

вісь слабого згину (перпендикулярна до полиць) z

(2) The convention for structural elements attached to the shell wall (see Figure 1.5) is different for meridional and circumferential members.

(3) The convention for meridional straight structural elements (see Figure 1.5(I)) attached to the shell wall is:

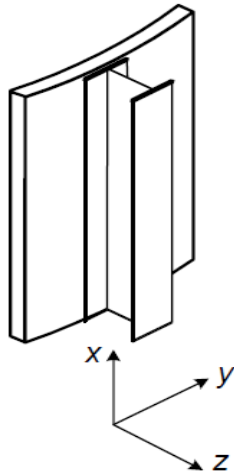
meridional coordinate for barrel, hopper and roof attachment x

strong bending axis (parallel to flanges: axis for meridional bending) y

weak bending axis (perpendicular to flanges) z

(4) Положення щодо координат для елементів, з'єднаних з оболонкою в кільцевому напрямку наступні (див. Рисунок 1.5(II)):

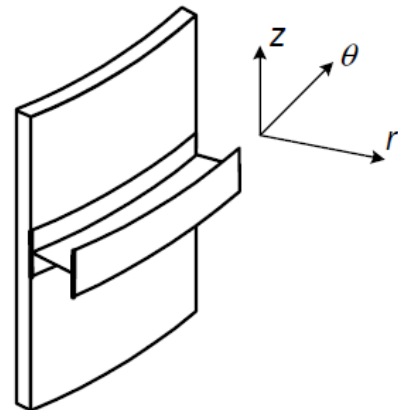
кільцева (криволінійна)	координатна вісь	вісь θ
радіальна вісь (вісь згину в меридіональній площині)	(вісь згину в меридіональній площині)	r
меридіональна вісь (вісь кільцевого згину)	(вісь кільцевого згину)	z



a) меридіональний елемент жорсткості
a) meridional stiffener

(4) The convention for circumferential curved structural elements (see Figure 1.5(II)) attached to a shell wall is:

кільцева (криволінійна)	координатна вісь	вісь θ
радіальна вісь (вісь згину в меридіональній площині)	(вісь згину в меридіональній площині)	r
меридіональна вісь (вісь кільцевого згину)	(вісь кільцевого згину)	z



b) кільцевий елемент жорсткості
b) circumferential stiffener

Рисунок 1.5 – Місцева система координат для меридіональних та кільцевих елементів жорсткості оболонки

Figure 1.5 – Local coordinate system for meridional and circumferential stiffeners on a shell

2 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Загальні положення

(1)P Проектування оболонок має виконуватись у відповідності з вимогами, що викладені у EN 1990 та EN 1999-1-1.

(2)P Для граничних станів за несучою здатністю та за експлуатаційною придатністю мають бути прийняті відповідні часткові коефіцієнти.

(3)P Для перевірки розрахунків по граничному стану за несучою здатністю, частковий коефіцієнт γ_M слід приймати наступним чином:

-опір текучості та нестійкості: γ_{M1}

-опір пластини на розтяг при руйнуванні:
 γ_{M2}

2 BASIS OF DESIGN

2.1 General

(1)P The design of shells shall be in accordance with the rules given in EN 1990 and EN 1999-1-1.

(2)P Appropriate partial factors shall be adopted for ultimate limit states and serviceability limit states.

(3)P For verification by calculation at ultimate limit states the partial factor γ_M shall be taken as follows:

- resistance to yielding and instability: γ_{M1}

- resistance of plate in tension to fracture: γ_{M2}

-опір вузлів: див. EN 1999-1-1

Примітка. Числові значення коефіцієнта γ_{M1} можуть бути визначені Національним Додатком. Наступні значення є рекомендованими:

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

(4) Для перевірки в граничному стані за експлуатаційною придатністю слід застосовувати частковий коефіцієнт $\gamma_{M,ser}$.

Примітка. Числові значення коефіцієнта $\gamma_{M,ser}$ можуть бути визначені Національним Додатком. Наступне значення є рекомендованим: $\gamma_{M,ser} = 1,0$.

2.2 Клас за відповідальністю та клас за виконанням

(1) Вибір 1, 2 чи 3 Класу за відповідальністю (див. EN 1999-1-1) має бути погоджений спільним рішенням проектувальника та замовника, приймаючи до уваги національні положення.

(2) Клас за виконанням (див. EN 1999-1-1) має бути визначений у виконавчій специфікації.

3 МАТЕРІАЛИ ТА ГЕОМЕТРІЯ

3.1 Властивості матеріалів

(1) EN 1999-1-5 стосується матеріалів (сплавів та загартованих матеріалів), що перераховані в EN 1999-1-1, Таблицях 3.2a і б, та в EN 1999-1-4 Таблиця 2.1 для холодноформованих листів.

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

(3) У загальному чисельному розрахунку з урахуванням нелінійності матеріалу використовується відповідна крива напружень, що наведена в EN 1999-1-1, Додаток E.

3.2 Розрахункові значення геометричних даних

(1) Товщина t оболонки обирається з наведених у EN 1999-1-1 та EN 1999-1-4.

- resistance of joints: see EN 1999-1-1

NOTE: Numerical values for γ_{M1} may be defined in the National Annex. The following numerical values are recommended:

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

(4) For verifications at serviceability limit states the partial factor $\gamma_{M,ser}$ should be used.

NOTE: Numerical values for $\gamma_{M,ser}$ may be defined in the National Annex. The following numerical value is recommended: $\gamma_{M,ser} = 1,0$.

2.2 Consequence class and execution class

(1) The choice of Consequence Class 1, 2 or 3, see EN 1999-1-1, should be agreed between the designer and the owner of the construction work in cooperation, taking national provisions into account.

(2) The Execution Class, see EN 1999-1-1, should be defined in the execution specification.

3 MATERIALS AND GEOMETRY

3.1 Material properties

(1) EN 1999-1-5 applies to wrought materials (alloys and tempers) listed in EN 1999-1-1, Tables 3.2a and b and EN 1999-1-4 Table 2.1 for cold-formed sheeting.

(2) For service temperatures between 80°C and 100°C the material properties should be obtained from EN 1999-1-1.

(3) In a global numerical analysis using material nonlinearity, the appropriate stress-strain curve should be selected from EN 1999-1-1, Annex E.

3.2 Design values of geometrical data

(1) The thickness t of the shell should be taken as defined in EN 1999-1-1 and EN 1999-1-4.

пр. ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5:201X

(2) В якості базової поверхні для навантажень слід обирати серединну поверхню оболонки.

(3) Радіус r оболонки визначається як номінальний радіус серединної поверхні, вимірний по нормалі до осі обертання.

3.3 Геометричні допуски та геометричні дефекти

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

- некруглість (еліптичність) (відхилення від круглої форми);

- ексцентриситети (відхилення серединних поверхонь сегментів оболонки одна відносно іншої на стиках);

- місцеві вм'ятини (місцеві нормальні відхилення від 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. 6.2.2.

4 ДОВГОВІЧНІСТЬ

(1) Основні вимоги викладено у розділі 4 EN 1999-1-1

(2) Особливу увагу слід приділити випадкам, коли розглядається сумісна робота різних матеріалів, особливо якщо їх електрохімічний склад може спровокувати появу корозії.

Примітка. У EN ISO 12944-2 наведено категорії корозійної стійкості під дією природних факторів для механічних кріпильних елементів, див. EN 1999-1-4.

(3) Також до уваги слід прийняти природні умови, що переважали з моменту виробництва, включаючи транспортування та зберігання на складальному майданчику.

5 РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЙ

5.1 Геометричні характеристики

(1) Оболонка має бути представлена серединною поверхнею.

(2) The middle surface of the shell should be taken as the reference surface for loads.

(3) The radius r of the shell should be taken as the nominal radius of the middle surface of the shell, measured normal to the axis of revolution.

3.3 Geometrical tolerances and geometrical imperfections

(1) The following geometrical deviations of the shell surface from the nominal shape should be considered:

-out-of-roundness (deviation from circularity);

- eccentricities (deviations from a continuous middle surface in the direction normal to the shell along junctions of plates);

- local dents (local normal deviations from the nominal middle surface).

NOTE: EN 1090-3 contains requirements to geometrical tolerances for shell structures.

(2) For geometrical tolerance related to buckling resistance, see 6.2.2.

4 DURABILITY

(1) For basic requirements, see Section 4 of EN 1999-1-1

(2) Special attention should be given to cases in which different materials are intended to act compositely, if these materials are such that electrochemical phenomena might produce conditions leading to corrosion.

NOTE: For corrosion resistance of fasteners for the environmental corrosivity categories following EN ISO 12944-2 see EN 1999-1-4.

(3) The environmental conditions prevailing from the time of manufacture, including those during transport and storage on site, should be taken into account.

5 STRUCTURAL ANALYSIS

5.1 Geometry

(1) The shell should be represented by its middle surface.

(2) У якості радіусу кривизни приймається номінальний радіус кривизни.

(3) Сукупність сегментів оболонки не слід розділяти на окремі сегменти для розрахунку, окрім випадків коли граничні умови для кожного сегмента вибираються таким чином, щоб об'єктивно моделювати взаємодію між ними.

(4) Розрахункова модель повинна містити опорне кільце, що передає опорні реакції на оболонку.

(5) Ексцентриситети і уступи серединної поверхні оболонки слід включати до розрахункової моделі, якщо вони є причиною значного згину внаслідок результуючих мембранних напружень, що прикладені ексцентрично.

(6) Будь який ексцентриситет між серединними поверхнями сегментів оболонок на стиках має бути врахований у розрахунковій моделі.

(7) Кільце жорсткості вважається окремим елементом конструкції крім випадку коли крок кілець менший за $1,5\sqrt{rt}$

(8) Оболонка з дискретно розташованими стрингерами може розглядатись як ортотропна рівномірна оболонка, за умови, що відстань між стрингерами не перевищує $5\sqrt{rt}$.

(9) Гофрована (в осьовому чи кільцевому напрямку) оболонка може розглядатись як ортотропна рівномірна оболонка, за умови, що ширина гофри не перевищує $0,5\sqrt{rt}$ (див. А.5.7).

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

(11) Загальна стійкість конструкції вцілому може бути визначена згідно положень EN 1993 частин 3-1, 3-2, 4-1, 4-2 або 4-3.

5.2 Граничні умови

(1) Відповідні граничні умови слід використовувати при розрахунках для

(2) The radius of curvature should be taken as the nominal radius of curvature.

(3) An assembly of shell segments should not be subdivided into separate segments for analysis unless the boundary conditions for each segment are chosen in such a way as to represent interactions between them in a conservative manner.

(4) A base ring intended to transfer support forces into the shell should be included in the analysis model.

(5) Eccentricities and steps in the shell middle surface should be included in the analysis model if they induce significant bending effects as a result of the membrane stress resultants following an eccentric path.

(6) At junctions between shell segments, any eccentricity between the middle surfaces of the shell segments should be considered in the modelling.

(7) A ring stiffener should be treated as a separate structural component of the shell, except where the spacing of the rings is closer than $1,5\sqrt{rt}$

(8) A shell that has discrete stringer stiffeners attached to it may be treated as an orthotropic uniform shell provided that the stringer stiffeners are no further apart than $5\sqrt{rt}$.

(9) A shell that is corrugated (axially or circumferentially) may be treated as an orthotropic uniform shell provided that the corrugation wavelength is less than $0,5\sqrt{rt}$ (see A.5.7).

(10) A hole in the shell may be neglected in the modelling provided its largest dimension is smaller than $0,5\sqrt{rt}$.

(11) The overall stability of the complete structure can be verified as detailed in EN 1993 Parts 3-1, 3-2, 4-1, 4-2 or 4-3 as appropriate.

5.2 Boundary conditions

(1) The appropriate boundary conditions should be used in analyses for the assessment

оцінки граничних станів згідно з умовами, що визначені в Таблиці 5.1. Спеціальні умови, необхідні для обчислень втрати стійкості, викладені в пункті 6.2.

of limit states according to the conditions shown in Table 5.1. For the special conditions needed for buckling calculations, reference should be made to 6.2.

Таблиця 5.1 – Граничні умови для оболонок
Table 5.1 – Partial safety factors for joints

Позначення граничних умов Boundary conditi code	Спрощена назва Simple term	Опис Description			Нормальні зміщення Normal displacements	Меридіональні зміщення Meridional displacements	Меридіональний поворот Meridional rotation
		Радіально Radially	Меридіонально Meridionally	Поворотно Rotation			
BC1r	зацімлено clamped	зацімлено restrained	зацімлено restrained	зацімлено restrained	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC1f		зацімлено restrained	зацімлено restrained	вільно free	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC2r		зацімлено restrained	вільно free	зацімлено restrained	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC2f	шарнір pinned	зацімлено restrained	вільно free	вільно free	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC3	вільний край free edge	вільно free	вільно free	вільно free	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$

Примітка. Кільцеве зміщення v тісно пов'язане зі зміщенням w , що є нормальним до поверхні, тому для цих двох параметрів окремі граничні умови не вказуються.

NOTE: The circumferential displacement v is very closely linked to the displacement w normal to the surface so separate boundary conditions are not needed.

5.3 Дії та впливи навколишнього середовища

(1) Передбачається, що всі дії та впливи прикладаються до серединної поверхні оболонки. Ексцентриситети навантаження повинні бути представлені статичними еквівалентними зусиллями і моментами на серединній поверхні оболонки.

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

(3) Перелік впливів і їх комбінацій наведено в EN 1991 та EN 1990. Під час розрахунку конструкцій повинні враховуватися всі наступні фактори, при їх наявності:

5.3 Actions and environmental influences

(1) Actions should all be assumed to act at the shell middle surface. Eccentricities of load should be represented by static equivalent forces and moments at the shell middle surface.

(2) Local actions and local patches of action should not be represented by equivalent uniform loads unless otherwise stated.

(3) The actions and combinations of actions are given in EN 1991 and EN 1990. In addition, those of the following actions that are relevant for the structure, should be considered in the structural analysis:

- місцеве осідання під стінками оболонки;
- місцеве осідання під дискретними опорами;
- однорідність опори конструкції;
- перепад температур від однієї сторони конструкції до іншої;
- перепад температур зсередини конструкції назовні;
- вітрові впливи на отвори і прорізи;
- взаємодія вітрових впливів у групах конструкцій;
- з'єднання з іншими конструкціями;
- умови в процесі монтажу.

(4) Внаслідок того що навантаження сприймаються мембранними зусиллями, оболонки можуть бути чутливими до певних геометричних змін, наприклад, до вм'ятин. На додаток до неменучих відхилень 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 С.4, слід визначити які наслідки це матиме для несучої здатності. Рекомендується виконувати періодичну перевірку геометрії.

(5) При виборі концепції проектування слід вжити заходи для зменшення ризику появи випадкових вм'ятин.

Такими заходами, наприклад, можуть бути більш товста, ніж цього потребує розрахунок, стінка, або додатковий захист вразливих місць.

5.4 Результуючі напруження та напруження

(1) За умови, що співвідношення радіуса до товщини є більшим за $(r/t)_{\min} = 25$, кривизною оболонки можна знехтувати при розрахунку результуючим напруженням в стінці оболонки.

- local settlement under shell walls;
- local settlement under discrete supports;
- uniformity of support of structure;
- thermal differentials from one side of the structure to the other;
- thermal differentials from inside to outside the structure;
- wind effects on openings and penetrations;
- interaction of wind effects on groups of structures;
- connections to other structures;
- conditions during erection.

(4) Shells may, due to how the loads are carried by membrane forces, be sensitive to a change in geometry e.g. by dents. In addition to unavoidable deviations in geometry from execution, dents may come from unforeseen actions during service. The sensitivity will be increased where the members consists of relatively thin sections. In case dents are introduced that exceeds those values given in C.4 the consequences for the load bearing capacity should be investigated. A program for periodical check of the geometry is recommended.

(5) When selecting the design concept, means to avoid the risk of unacceptable dents should be considered.

Such means may e.g. be using a larger thickness than necessary according to the structural calculations, or to arrange for protective means for areas where the risk is judged to be significant.

5.4 Stress resultants and stresses

(1) Provided that the radius to thickness ratio is greater than $(r/t)_{\min} = 25$, the curvature of the shell may be ignored when calculating the stress resultants from the stresses in the shell wall.

5.5 Види розрахунку

(1) Проектування має бути засноване на одному або декількох видах розрахунку, що наведені в Таблиці 5.2 в залежності від граничного стану або інших обставин. Види розрахунку описані в Таблиці 5.3. Більш детально див. EN 1993-1-6.

5.5 Types of analysis

(1) The design should be based on one or more of the types of analysis given in Table 5.2 depending on the limit state and other considerations. The types of analysis are further explained in Table 5.3. For more details, reference is made to EN 1993-1-6.

Таблиця 5.2 – Види розрахунку оболонок
Table 5.2 – Types of shell analysis

Вид розрахунку Type of analysis	Теорія оболонки Shell theory	Поведінка матеріалу Material law	Геометрія оболонки Shell geometry
Мембранна теорія оболонок (МТО) Membrane theory analysis MTA	мембранна рівновага membrane equilibrium	не враховується not applicable	ідеальна ¹⁾ perfect ¹⁾
Лінійно-пружний розрахунок оболонок (ЛР) Linear elastic shell analysis LA	лінійний згин і розтяг linear bending and stretching	лінійна linear	ідеальна ¹⁾ perfect ¹⁾
Лінійно-пружний розрахунок біфуркації (ЛРБ) Linear elastic bifurcation analysis LBA	лінійний згин і розтяг linear bending and stretching	лінійна linear	ідеальна ¹⁾ perfect ¹⁾
Геометрично нелінійний пружний розрахунок (ГНР) Geometrically non-linear elastic analysis GNA	нелінійна non-linear	лінійна linear	ідеальна ¹⁾ perfect ¹⁾
Фізично нелінійний розрахунок (МНР) Materially non-linear analysis MNA	лінійна linear	нелінійна non-linear	ідеальна ¹⁾ perfect ¹⁾
Геометрично і фізично нелінійний розрахунок (ГМНР) Geometrically and materially non-linear analysis GMNA	нелінійна non-linear	нелінійна non-linear	ідеальна ¹⁾ perfect ¹⁾
Геометрично нелінійний пружний розрахунок з урахуванням дефектів (ГНДР) Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections GNIA	нелінійна non-linear	лінійна linear	неідеальна ²⁾ imperfect ²⁾
Геометрично і фізично нелінійний розрахунок з урахуванням дефектів (ГМНДР) Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections GMNIA	нелінійна non-linear	нелінійна non-linear	неідеальна ²⁾ imperfect ²⁾

1) Термін «ідеальна геометрія» означає, що в розрахунковій моделі використовується номінальна геометрія без врахування геометричних відхилень.

1) Perfect geometry means that the nominal geometry is used in the analytical model without taking the geometrical deviations into account.

- 2) Термін «неідеальна геометрія» означає, що в розрахунковій моделі враховані геометричні відхилення від номінальної геометрії.
 2) Imperfect geometry means that the geometrical deviations from the nominal geometry (tolerances) are taken into account in the analytical model.

Таблиця 5.3 – Опис видів розрахунку оболонок
Table 5.3 – Description of types of shell analysis

<p>Мембранна теорія оболонок (МТО)</p> <p>Membrane theory analysis (MTA)</p>	<p>Розрахунок, що визначає поведінку тонкостінної оболонкової конструкції під дією розподілених навантажень за умови, що мембранні зусилля задовольняють умови рівноваги із зовнішніми навантаженнями.</p> <p>An analysis of a shell structure under distributed loads assuming a set of membrane forces that satisfy equilibrium with the external loads.</p>
<p>Лінійно-пружний розрахунок (ЛР)</p> <p>Linear elastic analysis (LA)</p>	<p>Розрахунок на основі теорії лінійно-пружного згину оболонки при малих деформаціях, припускаючи, що геометрія є ідеальною.</p> <p>An analysis on the basis of the small deflection linear elastic shell bending theory assuming perfect geometry.</p>
<p>Лінійно-пружний розрахунок біфуркації (ЛРБ)</p> <p>Linear elastic bifurcation (eigenvalue) analysis (LBA)</p>	<p>Розрахунок, який оцінює лінійне біфуркаційне власне значення для тонкостінної оболонкової конструкції на основі теорії лінійно-пружного згину оболонки при деформаціях, малих по відношенню до ідеальної геометрії серединної поверхні оболонки. Слід зазначити, що згадане лінійне біфуркаційне власне значення не відноситься до форм власних коливань.</p> <p>An analysis that calculates the linear elastic bifurcation eigenvalue on the basis of small deflections using the linear elastic shell bending theory, assuming perfect geometry. Note that eigenvalue in this context does not refer to vibration modes.</p>
<p>Геометрично нелінійний пружний розрахунок (ГНР)</p> <p>Geometrically non-linear analysis (GNA)</p>	<p>Розрахунок на основі теорії згину оболонки для ідеальної геометрії з урахуванням лінійно-пружних характеристик матеріалу та нелінійної теорії великих деформацій.</p> <p>An analysis on the basis of the shell bending theory assuming perfect geometry, considering non-linear large deflection theory and linear elastic material properties.</p>

Продовження таблиці 5.3	
<p>Фізично нелінійний розрахунок (МНР)</p> <p>Materially non-linear analysis (MNA)</p>	<p>Розрахунок, подібний до (ЛР) , але із урахуванням нелінійних пружно-пластичних характеристик матеріалу. У зварних конструкціях слід змодельювати ділянки металу, що зазнали впливу нагрівання.</p> <p>An analysis equal to (LA), however, considering non-linear material properties. For welded structure the material in the heat-affected zone should be modelled.</p>
<p>Геометрично і фізично нелінійний розрахунок (ГМНР)</p> <p>Geometrically and materially non-linear analysis (GMNA)</p>	<p>Розрахунок на основі теорії згину оболонки для ідеальної конструкції з використанням припущень нелінійної теорії великих деформацій переміщень із урахуванням нелінійних пружно-пластичних характеристик матеріалу. У зварних конструкціях слід змодельювати ділянки металу, що зазнали впливу нагрівання.</p> <p>An analysis applying the shell bending theory assuming perfect geometry, considering non-linear large deflection theory and non-linear material properties. For welded structure the material in the heat-affected zone should be modelled.</p>
<p>Фізично нелінійний пружний розрахунок з урахуванням дефектів (ГНДР)¹⁾</p> <p>Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections included (GNIA)¹⁾</p>	<p>Розрахунок, подібний до (ГНР), але із урахуванням неідеальної геометрії.</p> <p>An analysis equal to (GNA), however, considering an imperfect geometry.</p>
<p>Геометрично і фізично нелінійний розрахунок з урахуванням дефектів (ГМНДР)</p> <p>Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections included (GMNIA)</p>	<p>Розрахунок, подібний до (ГМНР), але із урахуванням неідеальної геометрії.</p> <p>An analysis equal to (GMNA), however, considering an imperfect geometry.</p>
<p>1) Цей метод не розглядається в даному документі і наведений лише для представлення повного переліку видів розрахунку оболонок.</p> <p>1) This type of analyses is not covered in this standard, however, listed here for the purpose of having a complete presentation of types of shell analysis.</p>	

6 ГРАНИЧНИЙ СТАН ЗА НЕСУЧОЮ ЗДАТНОСТЮ

6.1 Опір поперечного перерізу

6.1.1 Розрахункові значення напружень

(1) У кожній точці конструкції за розрахункову величину напруження $\sigma_{eq,Ed}$ приймається найвище первинне напруження, визначене при розрахунку конструкції, що враховує закони рівноваги між прикладеним розрахунковим навантаженням і внутрішніми зусиллями та

6 ULTIMATE LIMIT STATE

6.1 Resistance of cross section

6.1.1 Design values of stresses

(1) At each point in the structure the design value of the stress $\sigma_{eq,Ed}$ should be taken as the highest primary stress determined in a structural analysis that considers the laws of equilibrium between imposed design load and internal forces and moments.

моментами.

(2) За первинне напруження можна прийняти максимальне значення напружень, необхідних для рівноваги з прикладеними навантаженнями в точці або вздовж вісесиметричної лінії в пустотілої конструкції.

(3) При використанні мембранної теорії розрахунку, отримане в результаті двовимірне поле результуючих напружень $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$ може бути представлено еквівалентним розрахунковим напруженням $\sigma_{eq,Ed}$, отриманим за формулою:

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed}n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \quad (6.1)$$

(4) При використанні розрахунку (ЛР) або (ГНР) отримане в результаті двовимірне поле первинних напружень може бути представлено еквівалентним розрахунковим напруженням фон Мізеса:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2 + \tau_{xn,Ed}^2 + \tau_{\theta n,Ed}^2)} \quad (6.2)$$

де:

in which:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4} \right), \sigma_{\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4} \right) \quad (6.3)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4} \right), \tau_{xn,Ed} = \frac{q_{xn,Ed}}{t}, \tau_{\theta n,Ed} = \frac{q_{\theta n,Ed}}{t} \quad (6.4)$$

η поправочний коефіцієнт непружної поведінки матеріалу в залежності від жорсткості або пластичності сплаву.

η being a correction factor due to inelastic behaviour of material and depending on both hardening and ductility features of the alloy.

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

NOTE 1: The above expressions give a simplified conservative equivalent stress for design purposes.

Примітка 2. Величини для η наведені у EN 1999-1-1 в Додатку Н як функція від властивостей сплаву. Значення η залежать від коефіцієнта геометричної форми α_0 , що приймається рівним $\alpha_0 = 1,5$.

NOTE 2: Values for η are given in EN 1999-1-1 Annex H as a function of alloy features. Values of η corresponding to α_0 geometrical shape factor $\alpha_0 = 1,5$ should be taken

Примітка 3. Значення $\tau_{xn,Ed}$ і $\tau_{\theta n,Ed}$ зазвичай дуже малі і не мають впливу на опір, тому, як правило, ними можна знехтувати.

NOTE 3: The values of $\tau_{xn,Ed}$ і $\tau_{\theta n,Ed}$ are usually very small and do not affect the resistance, so they may generally be ignored.

6.1.2 Розрахункові значення опору

(1) Еквівалентна розрахункова міцність фон Мізеса визначається за формулою:

$$f_{eq,Rd} = \frac{f_0}{\gamma_{M1}} \quad (6.5)$$

$$f_{eq,Rd} = \min\left(\frac{P_{u,HAZ} f_u}{\gamma_{M2}}, \frac{f_0}{\gamma_{M1}}\right) \quad (6.6)$$

де:

f_0 характеристичне значення умовної границі текучості, що відповідає залишковій деформації 0,2 %, як зазначено в EN 1999-1-1.

f_u характеристичне значення границі міцності на розтяг, як зазначено в EN 1999-1-1.

$P_{u,HAZ}$ співвідношення між границею міцності на розтяг в зоні термічного впливу ЗТВ та в основному матеріалі як зазначено в EN 1999-1-1.

γ_{M1} частковий коефіцієнт опору, що наведений в 2.1 (3).

γ_{M2} частковий коефіцієнт опору, що наведений в 2.1 (3).

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

6.1.3 Обмеження напружень

(1) При кожній перевірці цього граничного стану розрахункове напруження повинно задовольняти умову:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad (6.7)$$

6.1.4 Проектування шляхом числового аналізу

(1) Розрахунковий опір межі пластичності визначається через коефіцієнт навантаження R , який використовується для розрахункових значень комбінацій впливів для відповідних комбінацій навантажень.

(2) Розрахункові значення впливів F_{Ed} слід визначати згідно з 5.3.

6.1.2 Design values of resistance

(1) The von Mises equivalent design strength should be taken from:

where:

f_0 is the characteristic value of the 0,2 % proof strength as given in EN 1999-1-1.

f_u is the characteristic value of the ultimate strength as given in EN 1999-1-1.

$P_{u,HAZ}$ is the ratio between the ultimate strength in the heat affected zone HAZ and in the parent material, as given in EN 1999-1-1.

γ_{M1} is the partial factor for resistance given in 2.1 (3).

γ_{M2} is the partial factor for resistance given in 2.1 (3).

(2) The effect of fastener holes should be taken into account in accordance with EN 1999-1-1.

6.1.3 Stress limitation

(1) In every verification of this limit state, the design stresses should satisfy the condition:

6.1.4 Design by numerical analysis

(1) The design plastic limit resistance should be determined as a load ratio R applied to the design values of the combination of actions for the relevant load case.

(2) The design values of the actions F_{Ed} should be determined as detailed in 5.3.

(3) При МНР або ГМНР розрахунку, заснованому на розрахунковій межі текучості f_o/γ_M , на оболонку мають впливати розрахункові величини навантажень, із поступовим збільшенням на коефіцієнт навантажень R до досягнення граничного стану пластичності.

(4) При використанні розрахунку МНР як коефіцієнт запасу R_{MNA} може бути прийняте найбільше значення, що отримане при розрахунку. Ефект деформаційного зміцнення може бути врахований, за умови що прийнято відповідне граничне значення допустимої деформації матеріалу. Інструкції з побудови розрахункових моделей напружено-деформованих систем для МНР наведені в EN 1999-1-1.

(5) При використанні розрахунку ГМНР, якщо він прогнозує максимальне навантаження, а потім його зменшення, для визначення коефіцієнта запасу R_{GMNA} використовується максимальне значення. Якщо розрахунок ГМНР не передбачає максимального навантаження, але показує поступово зростаючу залежність «дія-зміщення» (без деформаційного зміцнення матеріалу або з ним), коефіцієнт запасу R_{GMNA} слід прийняти не більшим ніж величина, при якій максимальна еквівалентна пластична деформація Мізеса в конструкції набуває граничного значення деформації для сплаву, що наведене у EN 1999-1-1, Розділ 3. Для потреб проектування граничне значення пластичної деформації дорівнює $5(f_o/E)$ або $10(f_o/E)$ і обирається в залежності від особливостей сплаву.

Примітка. Значення граничної пластичної деформації ϵ_u відповідне до $5(f_o/E)$ or $10(f_o/E)$ подані у EN 1999-1-1, Додаток Н.

(6) Результати розрахунку мають задовольняти умову:

$$R = \frac{F_{RD}}{F_{ED}} \geq 1,0 \quad (6.8)$$

де:
 F_{Ed} розрахункове значення

(3) In an materially non-linear analysis (MNA) and geometrically and materially non-linear analysis (GMNA) based on the design limiting strength f_o/γ_M , the shell should be subject to the design value of the loads, progressively increased by the load ratio R until the plastic limit condition is reached.

(4) If an materially non-linear analysis (MNA) is used, the load ratio R_{MNA} may be taken as the largest value attained in the analysis. The effect of strain hardening may be included provided that a corresponding limit value of allowable material deformation is considered. Guidelines on analytical models for stress-strain relationship to be used in MNA are given in EN 1999-1-1.

(5) If a geometrically and materially non-linear analysis (GMNA) is used, if the analysis predicts a maximum load followed by a descending path, the maximum value should be used to determine the load ratio R_{GMNA} . If a GMNA analysis does not predict a maximum load, but produces a progressively rising action-displacement relationship (with or without strain hardening of the material), the load ratio R_{GMNA} should be taken as no larger than the value at which the maximum von Mises equivalent plastic strain in the structure attains the alloy ultimate deformation limit value as given in EN 1999-1-1, Section 3. For design purposes, an ultimate plastic strain value equal to $5(f_o/E)$ or $10(f_o/E)$ can be assumed, depending on the alloy features.

NOTE: Values of ultimate plastic strain values ϵ_u corresponding to $5(f_o/E)$ or $10(f_o/E)$ are given in EN 1999-1-1, Annex H.

(6) The result of the analysis should satisfy the condition:

where:
 F_{Ed} is the design value of the action.

навантаження.

6.2 Опір втраті стійкості

6.2.1 Загальні положення

(1) Мають бути враховані всі важливі комбінації впливів, що призводять до стискуючих мембранних напружень або дотичних мембранних напружень у стінці оболонки.

(2) Приймається наступне правило знаків для розрахунку на втрату стійкості: меридіональні та кільцеві стискуючі напруження і результуючі напруження вважаються додатніми.

(3) Особливу увагу слід 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 6.1.

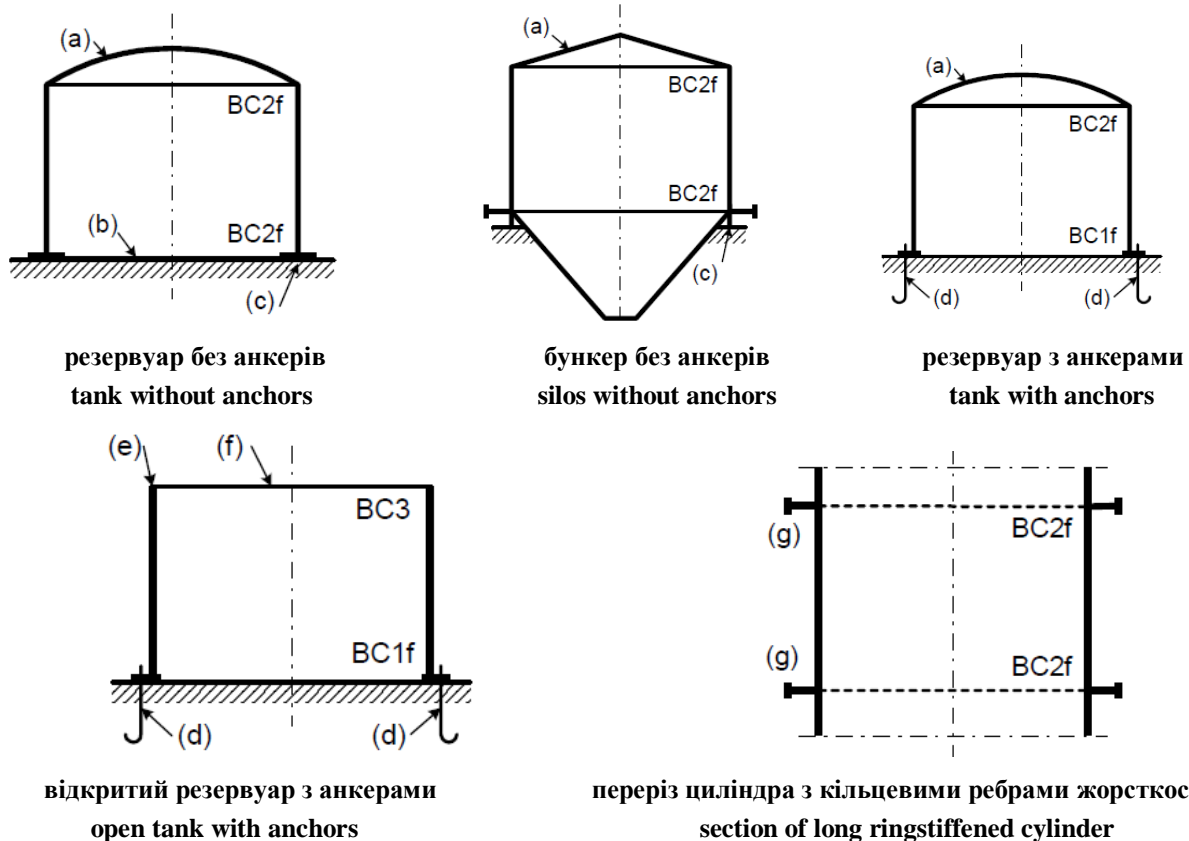
6.2 Buckling resistance

6.2.1 General

(1) All relevant combinations of actions causing compressive membrane stresses or shear membrane stresses in the shell wall should be taken into account.

(2) The sign convention for use in calculation for buckling should be taken as compression positive for meridional and circumferential stresses and stress resultants.

(3) Special attention should be paid to the boundary conditions which are relevant to the incremental displacements due to buckling (as opposed to pre-buckling displacements). Examples of relevant boundary conditions are shown in Figure 6.1.



Позначення: (а) дах, (b) дно, (c) анкерування відсутнє, (d) близько розміщені анкери, (e) відсутнє кільце жорсткості, (f) вільний край, (g) кільце жорсткості.

Keys: (a) roof, (b) bottom plate, (c) no anchoring, (d) closely spaced anchor bolts, (e) no stiffening ring, (f) free edge, (g) ring stiffener.

Рисунок 6.1 – Схематичні приклади граничних умов для граничного стану за втратою стійкості

Figure 6.1 – Schematic examples of boundary conditions for buckling limit state

6.2.2 Характерні для втрати стійкості геометричні допуски

(1) При граничному стані за несучою здатністю повинні бути дотримані межі геометричних допусків, подані у EN 1090-3.

Примітка 1. Розрахункові напруження при втраті стійкості, визначені далі, враховують дефекти, що базуються на геометричних допусках, які передбачаються в процесі виконання.

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

(2) Необхідно вибрати клас допуску (Клас 1, Клас 2, Клас 3 або Клас 4), керуючись як наявною комбінацією навантажень, так і вимогами щодо допусків, наведеними у EN 1090-3. Суть кожного класу відноситься лише до оцінки міцності.

(3) Кожен із видів дефектів повинен класифікуватися окремо. Найнижчий наявний клас, в результаті, визначає весь алгоритм проектування.

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

6.2.3 Оболонки під сумісною дією стиску і зсуву

6.2.3.1 Розрахункові значення напружень

(1) За розрахункові величини напружень $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ і τ_{Ed} слід приймати основні значення стискуючих і дотичних мембранних напружень, отримані лінійно-пружним розрахунком оболонки (ЛР). В умовах чистого вісесиметричного навантаження і опирання, а також при інших простих комбінаціях навантажень, зазвичай, можна використовувати мембранну теорію.

(2) За основні значення мембранних напружень слід приймати максимальні значення кожного напруження на даній осьовій координаті в конструкції, за винятком випадків, яких стосуються особливі положення, приведені у Додатку А.

6.2.2 Buckling-relevant geometrical tolerances

(1) The geometrical tolerance limits given in EN 1090-3 should be met if buckling is one of the ultimate limit states to be considered.

NOTE 1: The design buckling stresses determined hereafter include imperfections that are based on geometric tolerances expected to be met during execution.

NOTE 2: The geometric tolerances given in EN 1090-3 are those that are known to have a large impact on the safety of the structure.

(2) The tolerance class (Class 1, Class 2, Class 3 or Class 4) should be chosen according to both load case and tolerance definitions given in EN 1090-3. The description of each class relates only to the strength evaluation.

(3) Each of the imperfection types should be classified separately; the lowest class should then govern the entire design.

(4) The different tolerance types may each be treated independently, and no interactions need normally be considered.

6.2.3 Shell in compression and shear

6.2.3.1 Design values of stresses

(1) The design values of stresses $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ and τ_{Ed} , should be taken as the key values of compressive and shear membrane stresses as obtained by linear shell analysis (LA). Under purely axisymmetric conditions of loading and support, and in other simple load cases, membrane theory may generally be used.

(2) The key values of membrane stresses should be taken as the maximum value of each stress at that axial coordinate in the structure, unless specific provisions are given in Annex A.

Примітка. В деяких випадках (наприклад, для ступінчастих стінок під дією кільцевого стиску, див. Додаток А.2.3) основні значення мембранного напруження є помилковими і перевищують реальні максимальні значення.

(3) Для основних комбінацій навантажень мембранні напруження можна прийняти згідно відповідних стандартів.

6.2.3.2 Міцність при втраті стійкості

(1) Розрахункові напруження при втраті стійкості визначаються за формулами:

$$\sigma_{x,Rd} = \alpha_x \rho_{x,w} \chi_{x,perf} \frac{f_0}{\gamma_{M1}} \quad (6.9)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_{\theta} \rho_{\theta,w} \chi_{\theta,perf} \frac{f_0}{\gamma_{M1}} \quad (6.10)$$

$$\tau_{Rd} = \alpha_{\tau} \rho_{\tau,w} \chi_{\tau,perf} \frac{f_0}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \quad (6.11)$$

(також справедливі для підсилених оболонок)

(also valid for stiffened shells)

для непідсилених оболонок, чи

for unstiffened shells, and

$$n_{x,Rd} = \alpha_{n,x} \chi_{x,perf} \frac{n_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (6.12)$$

$$p_{n,Rd} = \alpha_{p,\theta} \chi_{\theta,perf} \frac{p_{n,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (6.13)$$

для підсилених та/або гофрованих оболонок

for stiffened and/or corrugated shells

де:

where:

$n_{x,Rk}$ межа осьової міцності підсиленої оболонки;

$n_{x,Rk}$ is the axial squash limit of the stiffened shell;

$p_{n,Rk}$ граничний тиск з умов рівномірного зминання для підсиленої оболонки або тороконічної/торосферичної оболонки;

$p_{n,Rk}$ is the uniform squash limit pressure of the stiffened shell or the toriconical and torispherical shell;

α_i коефіцієнт ослаблення пружного опору, що наводиться в Додатку А;

α_i is the imperfection reduction factor to be taken from Annex A;

$\rho_{i,w}$ коефіцієнт ослаблення в зонах термічного впливу, згідно з 6.2.4.4. Для оболонок без зварних швів $\rho_{i,w} = 1$;

$\rho_{i,w}$ is the reduction factor due to heat-affected zones according to 6.2.4.4. For shells without welds $\rho_{i,w} = 1$;

$\chi_{i,perf}$ понижуючий коефіцієнт для втрати

$\chi_{i,perf}$ is the reduction factor due to buckling

стійкості ідеальної оболонки, див. (2).

γ_{M1} частковий коефіцієнт опору, див. 2.1 (3).

Примітка 1. Формула (6.13) також дійсна для тороконічних і торосферичних оболонок, див. Додаток В

Примітка 2. α_i для тороконічних і торосферичних оболонок, див. Додаток В

(2) Понижуючий коефіцієнт для втрати стійкості ідеальної оболонки визначається за формулою:

$$\chi_{i,perf} = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{\phi_i^2 - \lambda_i^2}} \quad (6.14)$$

але

but

$$\chi_{i,perf} \leq 1,00$$

де:

with:

$$\phi_i = 0,5(1 + \mu_i(\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}) + \gamma_i^{-2}) \quad (6.15)$$

де:

where:

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

μ_i is a parameter depending on the alloy and loading case, to be taken from Annex A;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ відносна гнучкість за межею зминання, що міститься в Додатку А;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ is the squash limit relative slenderness, to be taken from Annex A;

i індекс, що має бути замінений на x , θ або τ .

i is subscript to be replaced by x , θ or τ depending on loading type.

(3) Відносна гнучкість оболонки для різних компонентів напруження визначається за формулами:

(3) The shell slenderness parameters for different stress components should be determined from:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_{x,cr}}} \quad (6.16)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_{\theta,cr}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_0}{\sqrt{3}\tau_{cr}}} \quad (6.18)$$

(також справедливе для підсилених оболонок)

(also valid for stiffened shells)

для непідсилених оболонок, та

for unstiffened shells, and

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{n_{x,Rk}}{n_{x,cr}}} \quad (6.19)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{p_{n,Rk}}{p_{n,cr}}} \quad (6.20)$$

для підсилених та/або гофрованих оболонки

for stiffened and/or corrugated shells.

Примітка 1. Формули (6.19) та (6.20) також дійсні для тороконічних і торосферичних оболонки, див. Додаток В

NOTE 1: Expressions (6.19) and (6.20) are also valid for toriconical and torispherical shells, see Annex B

Примітка 2. $p_{n,cr}$ для тороконічних і торосферичних оболонки, див. Додаток В

NOTE 2: $p_{n,cr}$ for toriconical and torispherical shells, see Annex B

де:

where:

$\sigma_{x,cr}$, $\sigma_{\theta,cr}$ і τ_{cr} критичні напруження втрати стійкості, що наведені в Додатку А або визначені за методом лінійно-пружного розрахунку біфуркації (ЛРБ);

$\sigma_{x,cr}$, $\sigma_{\theta,cr}$ and τ_{cr} are the critical buckling stresses as given in Annex A or obtained by linear elastic bifurcation (eigenvalue) analysis (LBA);

$n_{x,cr}$, $p_{n,cr}$ результуючі критичні напруження втрати стійкості для підсилених або тороконічних/торосферичних оболонки, що наведені в Додатку А або визначені за методом лінійно-пружного розрахунку біфуркації (ЛРБ);

$n_{x,cr}$, $p_{n,cr}$ are the critical buckling stress resultants for stiffened shells or toriconical and torispherical shells as given in Annex A or obtained by linear elastic bifurcation (eigenvalue) analysis (LBA).

6.2.3.3 Перевірка міцності на втрату стійкості

6.2.3.3 Buckling strength verification

(1) Незважаючи на те, що втрата стійкості не обумовлена лише напруженнями, граничний стан втрати стійкості в даному розділі повинен бути представлений шляхом обмеження розрахункових величин мембранних та результуючих напружень. Впливом згинальних напружень на міцність при втраті стійкості можна знехтувати за умови, що вони виникають у результаті відповідності вимогам сумісності граничних умов. Згинальні напруження від місцевих навантажень або теплових градієнтів потрібно розглядати за спеціальною методикою.

(1) Although buckling is not a purely stress-initiated failure phenomenon, the buckling strength verification should be represented by limiting the design values of membrane stresses or stress resultants. The influence of bending stresses on the buckling strength may be neglected provided they arise as a result of boundary compatibility effects. In the case of bending stresses from local loads or from thermal gradients, special consideration should be given.

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

(2) Depending on the loading and stressing situation, one or more of the following checks for the key values of single membrane stress components should be carried out:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (6.21)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (6.22)$$

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd} \quad (6.23)$$

(3) Якщо при даних впливах виникає одна з трьох складових мембранних напружень, що відноситься до втрати стійкості, слід виконати наступну перевірку взаємодії для складного напруженого стану:

(3) If more than one of the three buckling-relevant membrane stress components are present under the actions under consideration, the following interaction check for the combined membrane stress state should be carried out:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right)^{k_\theta} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}}\right) + \left(\frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1,00 \quad (6.24)$$

де:

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ і $\tau_{x\theta,Ed}$ – відносяться до взаємодії групи значущих величин стискуючих і дотичних мембранних напружень в оболонці, значення параметрів взаємодії k_x , k_θ , k_τ і k_i :

where:

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ and $\tau_{x\theta,Ed}$ are the interaction-relevant groups of the significant values of compressive and shear membrane stresses in the shell and the values of the interaction parameters k_x , k_θ , k_τ and k_i are:

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

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

$$k_\tau = 1,5 + 0,5 \chi_\tau^2 \quad (6.25)$$

$$k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2$$

Примітка 1. Для поздовжньо стиснутих непідсилених циліндрів під дією кільцевого стиску та зсуву для врахування параметрів комбінації зусиль можна використати вираз А.1.6.

NOTE 1: In case of unstiffened cylinder under axial compression and circumferential compression and shear the formulae in A.1.6 for the interaction parameters may be used.

Примітка 2. Ці правила можуть інколи бути дуже консервативними, але вони враховують два крайніх випадки, які, як відомо, є надійними для великої кількості випадків:

NOTE 2: The above rules may sometimes be very conservative, but they have the two limiting cases which are well established as safe for a wide range of cases:

а) у дуже тонких оболонках взаємодія між σ_x і σ_θ є приблизно лінійною;

a) in very thin shells the interaction between σ_x and σ_θ is linear;

б) у дуже товстих оболонках взаємодія набуває характеру еквівалентних напружень фон Мізеса або альтернативної взаємодії, сформульованої в EN 1999-1-1.

b) in very thick shells the interaction between stresses may be formulated as that of von Mises equivalent stress or that of alternative interaction formulae as given in EN 1999-1-1.

(4) Якщо $\sigma_{x,Ed}$ або $\sigma_{\theta,Ed}$ є розтягуючими напруженнями, їх значення у виразі (6.24) слід прийняти рівними нулю.

(4) If $\sigma_{x,Ed}$ or $\sigma_{\theta,Ed}$ is tensile, its value should be taken as zero in expression (6.24).

Примітка. Для поздовжньо стиснутих циліндрів із внутрішнім тиском (що викликає кільцевий розтяг) особливі положення приведені у Додатку А. Результуюче значення $\sigma_{x,Rd}$ враховує як зміцнюючий вплив внутрішнього тиску на опір пружній втраті стійкості, так і послаблюючий вплив явища пружно-пластичності «слонової ноги» (вираз А.22). Якщо у виразі (6.24) прийняти $\sigma_{\theta,Ed}$ рівним нулю, то отримаємо точну картину міцності при поздовжньому згині.

(5) Місця прикладання і величини кожного з мембранних напружень, що відносяться до втрати стійкості, які використовуються в комбінації у виразі (6.24), визначені у Додатку А.

6.2.4 Вплив зварювання

6.2.4.1 Загальні положення

(1) В проектуванні алюмінієвих оболонкових конструкцій слід дотримуватись загальних критеріїв і вимог до зварних конструкцій, викладених у EN 1999-1-1

(2) При проектуванні та розрахунку зварних конструкцій, у яких використовуються сплави з деформаційним або дисперсійним зміцненням, необхідно враховувати зниження міцності матеріалу у зонах навколо зварних швів. Ці ділянки називаються зонами теплового впливу (ЗТВ). Вийнятки до цього правила приведені у EN 1999-1-1.

(3) Для проектних цілей прийнято допущення, що по всій навколошовній зоні термічного впливу міцнісні характеристики знижуються на постійну величину.

Примітка 1. 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 загальної гнучкості конструкції та властивостей сплаву, може виявитись досить значним.

Примітка 2. Ефект пластифікації внаслідок зварювання є більш значущим для згину оболонок в зоні пластичності. Крім того, шви у зонах де є ризик втрати стійкості можуть суттєво знизити значення опору втраті стійкості внаслідок ЗТВ. Тому рекомендується уникати зварних швів у великих за розміром сегментах без елементів жорсткості, що перебувають під дією стиску.

Примітка 3. В проектних цілях зварювання можна розглядати, як лінійні смуги на поверхні оболонок,

NOTE: For axially compressed cylinders with internal pressure (leading to circumferential tension) special provisions are made in Annex A. The resulting value of $\sigma_{x,Rd}$ accounts for both the strengthening effect of internal pressure on the elastic buckling resistance and the weakening effect of the elastic plastic elephant's foot phenomenon (expression (A.22)). If the tensile stress $\sigma_{\theta,Ed}$ is then taken as zero in expression (6.24), the buckling strength is accurately represented.

(5) The locations and values of each of the buckling-relevant membrane stresses to be used together in combination in expression (6.24) are defined in Annex A.

6.2.4 Effect of welding

6.2.4.1 General

(1) General criteria and rules for welded structures given in EN 1999-1-1 should be followed in the design of aluminium shell structures.

(2) In the design of welded shell structures using strain hardened or artificially aged precipitation hardening alloys the reduction in strength properties that occurs in the vicinity of welds should be allowed for. This area is named heat affected zone (HAZ). Exceptions to this rule are stated in EN 1999-1-1.

(3) For design purposes it is assumed that throughout the heat affected zone the strength properties are reduced on a constant level.

NOTE 1: Even though the reduction mostly affects the 0,2 % proof strength and the ultimate tensile strength of the material, its effects can be significant on the compressed parts of a shells structures susceptible to buckling depending on structural slenderness and alloy properties.

NOTE 2: The effect of softening due to welding is more significant for buckling of shells in the plastic range. Also local welds in areas with risk of buckling may considerably reduce the buckling resistance due to the HAZ. It is therefore recommended to avoid welds in large unstiffened parts subject to compression.

NOTE 3: For design purposes the welding can be assumed as a linear strip across the shell surface whose

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 згину.

Примітка 4. Для деяких термооброблених сплавів можна усунути ефект знеміцнення у навколошовних зонах, застосовуючи штучне старіння після зварювання, див. EN 1999-1-1.

(4) Усі шви, що прямо чи опосередковано знаходяться під впливом стискуючих напружень слід перевірити на вплив пластифікації внаслідок зварювання на опір втраті стійкості оболонки, згідно з правилами, поданими у 6.2.4.2.

6.2.4.2 Кількісні показники пластифікації

(1) Кількісні показники пластифікації від зварювання описуються понижуючими коефіцієнтами $\rho_{o,haz}$ та $\rho_{u,haz}$, значення яких отримують зі співвідношень

$$\rho_{o,haz} = \frac{f_{o,haz}}{f_o} \quad (6,26)$$

і

and

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u}$$

між характеристичним значенням умовної границі текучості, що відповідає залишковій деформації 0,2 % $f_{o,haz}$ (або для границі міцності $f_{u,haz}$) у зоні термічного впливу та такими ж значеннями f_o (f_u) в основному матеріалі.

(2) Характеристичні значення умовної границі текучості $f_{o,haz}$ і границі міцності $f_{u,haz}$, а також значення $\rho_{o,haz}$ і $\rho_{u,haz}$ для наведені у табл. 3.2a EN 1999-1-1 для катаних алюмінієвих сплавів у вигляді листів, смуг і пластин та у табл. 3.2б для профілів

(3) Тривалість відновлення матеріалу після зварювання визначається положеннями норм EN 1999-1-1.

6.2.4.3 Визначення меж ЗТВ

(1) Необхідно дотримуватись загальних позначень меж ЗТВ, що наведені у

affected region extends immediately around the weld. Beyond this region the strength properties rapidly recover to their full unwelded values. A premature onset of yielding lines can occur along these lines when shell buckling takes place.

NOTE 4: The effects of HAZ softening can sometimes be mitigated by means of artificial ageing applied after welding, see EN 1999-1-1.

(4) The effect of softening due to welding on the shell buckling resistance should be checked for all welds directly or indirectly subjected to compressive stress according to the rules given in 6.2.4.2.

6.2.4.2 Severity of softening

(1) The severity of softening due to welding is expressed through the reduction factors $\rho_{o,haz}$ and $\rho_{u,haz}$ given by the ratios:

between the characteristic value of the 0,2 % proof strength $f_{o,haz}$ (ultimate strength $f_{u,haz}$) in the heat affected zone and the one f_o (f_u) in the parent material.

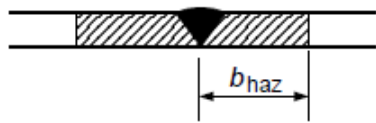
(2) The characteristic values of strength $f_{o,haz}$ and $f_{u,haz}$ and the values of $\rho_{o,haz}$ and $\rho_{u,haz}$ are listed in Table 3.2a of EN 1999-1-1 for wrought aluminum alloys in the form of sheet, strip and plate and in Table 3.2b for extrusions.

(3) Recovery times after welding should be evaluated according to provisions stated in EN 1999-1-1.

6.2.4.3 Extent of HAZ

(1) General indications on the HAZ extent given in EN 1999-1-1 should be followed.

(2) При перевірці на втрату стійкості, передбачається, що ЗТВ розповсюджується на відстань b_{haz} від шва в усіх напрямках та вимірюється від центральної лінії стикового шва, або точки перетину зварюваних поверхонь у випадку кутового шва, як показано на Рисунку 6.2.



(2) For the purposes of buckling checks, the HAZ in shell sheeting in areas at risk of buckling is assumed to extend for a distance b_{haz} in any direction from a weld, measured transversely from the centre line of an inline butt weld or from the point of intersection of the welded surfaces at fillet welds, as shown in Figure 6.2.

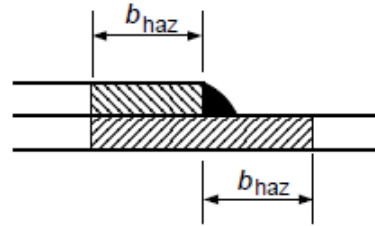


Рисунок 6.2 – Поширення зон термічного впливу (ЗТВ) в стінці оболонки обшивки
Figure 6.2 – Extend of heat-affected zones (HAZ) in shell sheeting

6.2.4.4 Опір втрати стійкості невідсилених зварних оболонок

(1) Опір втраті стійкості невідсилених зварних оболонок необхідно розраховувати, при наявності результуючих напружень стиску у поперечно нерозкріпленій оболонці.

(2) Перевірки впливу зварювання на опір втраті стійкості можна уникнути, якщо всі шви в оболонці паралельні до результуючих стискуючих напружень при будь-яких умовах навантажень, за умови, що понижуючий коефіцієнт $\rho_{o,haz}$ не нижчий за 0,60.

(3) Вплив зварювання на опір втраті стійкості можна визначати за допомогою методу геометрично і фізично нелінійного розрахунку з урахуванням дефектів (ГМНДР), властивостей основного матеріалу та матеріалу у ЗТВ.

(4) Якщо неможливо виконати точний ГМНДР розрахунок, то опір втраті стійкості можна визначити за спрощеним методом, а саме через понижуючий коефіцієнт, що визначається зі співвідношення $\rho_{i,w} = \chi_{i,w} / \chi_i$ між коефіцієнтом втрати стійкості зварюваної конструкції $\chi_{w,i}$ і не зварюваної конструкції χ_i .

6.2.4.4 Buckling resistance of unstiffened welded shells

(1) The buckling resistance of unstiffened welded shells should be assessed in any case if compressive stress resultants acting in laterally unrestrained welded panels are present in the shell.

(2) The check of the weld effect on buckling can be avoided if all welds in the shells are parallel to the compressive stress resultants acting in the structure under any load condition, provided that the reduction factor $\rho_{o,haz}$ due to HAZ is not lower than 0,60.

(3) The effect of welding on the buckling resistance can be evaluated by means of a geometrically and materially non-linear analysis with imperfections (GMNIA) analysis and accounting for the actual properties of both parent material and HAZ zones.

(4) If an accurate GMNIA analysis cannot be performed, the shell buckling resistance can be evaluated in a simplified way through the reduction factor given by the ratio $\rho_{i,w} = \chi_{i,w} / \chi_i$ between the buckling factor of the welded structure $\chi_{w,i}$ and the one of the unwelded structure χ_i .

Примітка 1. Результируючі стискуючі напруження можуть виникати не тільки через стиск, а також через зовнішній тиск, зсув і зосереджені навантаження. Якими б не були умови навантаження, понижуючий коефіцієнт $\chi_{w,i}$ слід застосовувати для швів, що є ортогональними до результируючих стискуючих напружень, так як вони можуть спричинити появу пластичних деформацій

Примітка 2. Індекс "i" у пунктах (4) і (5) слід замінювати на " χ ", " θ " чи " τ " залежно від приналежності коефіцієнтів χ та ρ відповідно до осевого стиску, кільцевого стиску чи зсуву.

(5) Понижуючий коефіцієнт, що враховує пом'якшення матеріалу в ЗТВ для оболонкових конструкцій визначають за:

$$\rho_{i,w} = \omega_0 + (1 - \omega_0) \frac{\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}}{\bar{\lambda}_{i,w} - \bar{\lambda}_{i,0}} \quad (6,27)$$

але

but

$$\rho_{i,w} \leq 1$$

і

and

$$\rho_{i,w} \geq \omega_0$$

де:

where:

$$\omega_0 = \frac{\rho_{u,haz} f_u / \gamma_{M2}}{f_o / \gamma_{M1}} \quad (6,28)$$

але

but

$$\omega_0 \leq 1$$

$\rho_{u,haz}$ та $\rho_{o,haz}$ це понижуючі коефіцієнти для ЗТВ, значення яких беруться з Таблиць 3.2a або 3.2b EN 1999-1-1;

$\rho_{u,haz}$ and $\rho_{o,haz}$ are the reduction factors due to HAZ, to be taken from Table 3.2a or Table 3.2b of EN 1999-1-1;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ коефіцієнт відносної гнучкості стиснутого елемента для випадку навантаження, що розглядається, визначається з Додатку А;

$\bar{\lambda}_{i,0}$ is the relative squash limit slenderness parameter for the load cases under consideration to be taken from Annex A;

$\bar{\lambda}_{i,w}$ це граничне значення коефіцієнту відносної гнучкості стиснутого елемента, за межею якого зникає вплив зварювання на опір втраті стійкості. Визначається за:
 $\bar{\lambda}_{i,w} = 1,39(1 - \rho_{o,haz})(\bar{\lambda}_{i,w,0} - \bar{\lambda}_{i,0})$, але
 $\bar{\lambda}_{i,w} \leq \bar{\lambda}_{i,w,0}$ див. Рисунок 6.3;

$\bar{\lambda}_{i,w}$ is the limit value of the relative slenderness parameter beyond which the effect of weld on buckling vanishes, given by:

$$\bar{\lambda}_{i,w} = 1,39(1 - \rho_{o,haz})(\bar{\lambda}_{i,w,0} - \bar{\lambda}_{i,0}), \text{ but}$$

$$\bar{\lambda}_{i,w} \leq \bar{\lambda}_{i,w,0} \text{ see Figure 6.3;}$$

$\bar{\lambda}_{i,w,0}$ абсолютне значення верхньої межі впливу зварювання для коефіцієнту відносної гнучкості стиснутого елемента, що залежить від характеру навантаження, матеріалу конструкції та класу допуску оболонки, що наведено в Таблиці 6.5.

$\bar{\lambda}_{i,w,0}$ is the absolute slenderness upper limit for the weld effect, depending on load case, structural material and tolerance class of the shell, as given in Table 6.5.

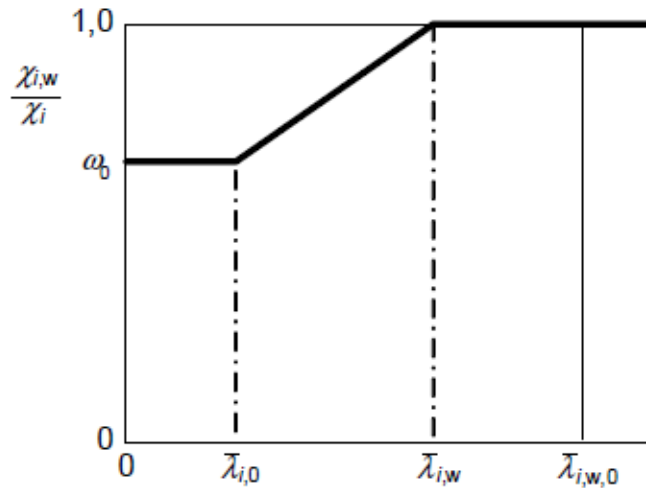


Рисунок 6.3 – Визначення понижуючого коефіцієнту $\rho_{i,w}$ впливу ЗТВ
Figure 6.3 – Definition of the reduction factor $\rho_{i,w}$ due to HAZ

Таблиця 6.5 – Значення $\bar{\lambda}_{i,w,0}$ для відповідних навантажень, визначених Додатком А

Table 6.5 – Values of $\bar{\lambda}_{i,w,0}$ for relevant load cases allowed for in Annex A

Клас допуску Tolerance class	Осьовий стиск Axial compression $\bar{\lambda}_{x,w,0}$		Кільцевий стиск Circumferential compression $\bar{\lambda}_{\theta,w,0}$		Кручення і зсув Torsion and shear $\bar{\lambda}_{\tau,w,0}$	
	Матеріал класу А Class A material	Матеріал класу В Class B material	Матеріал класу А Class A material	Матеріал класу В Class B material	Матеріал класу А Class A material	Матеріал класу В Class B material
Клас/Class 1	0.8	0.7	1.2	1.1	1.4	1.3
Клас/Class 2	1.0	0.9	1.3	1.2	1.5	1.4
Клас/Class 3	1.2	1.1	1.4	1.3	1.6	1.5
Клас/Class 4	1.3	1.2	-	-	-	-

6.2.4.5 Опір втраті стійкості підсилених зварних оболонок

(1) Для підсилених зварних оболонок дозволяється не проводити перевірку на вплив зварювання, якщо елементи жорсткості достатньо обмежують поперечні переміщення зварюваних

6.2.4.5 Buckling resistance of stiffened welded shells

(1) Stiffened welded shells do not need to be checked against the effect of welding if stiffeners have adequate lateral restraint to welded panels. If this is not the case the provisions in 6.2.4.4 apply.

панелей. В протилежному випадку застосовуються положення 6.2.4.4.

6.2.5 Проектування шляхом числового аналізу

(1) Тут можна застосувати процедуру, що наведена в 5.5 та 6.1.4 для геометрично і фізично нелінійного розрахунку з урахуванням дефектів (ГМНДР). Також розрахунок ГМНДР може бути альтернативою до методу, викладеного у 6.2.3, за умови прийняття в якості початкових геометричних недосконалостей максимальних значень допусків з 6.2.2.

(2) Для зварних конструкції необхідно моделювати матеріал в зонах термічного впливу, див. 6.2.4.2, 6.2.4.3 та 6.2.4.4.

7 ГРАНИЧНІ СТАНИ ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ ПРИДАТНІСТЮ

7.1 Загальні положення

(1) Правила для граничних станів за експлуатаційною придатністю, наведені у EN 1999-1-1 також застосовуються до оболонкових конструкцій.

7.2 Прогини

(1) Прогини можуть бути розраховані, виходячи з припущення про пружну поведінку конструкції.

(2) Згідно з EN 1990 – Додаток A1.4, граничні прогини мають бути визначені для кожного проекту і погоджені з замовником.

6.2.5 Design by numerical analysis

(1) The procedure given in 5.5 and 6.1.4 for geometrically and materially non-linear analysis with imperfections (GMNIA) analysis may be followed. The GMNIA analysis may be performed, as an alternative to the method given in 6.2.3, by assuming as initial geometrical imperfections the maximum values of tolerances given in 6.2.2.

(2) For welded structures the material in the heat-affected zone should be modelled, see 6.2.4.2, 6.2.4.3 and 6.2.4.4.

7 SERVICEABILITY LIMIT STATES

7.1 General

(1) The rules for serviceability limit states given in EN 1999-1-1 should also be applied to shell structures.

7.2 Deflections

(1) The deflections may be calculated assuming elastic behaviour.

(2) With reference to EN 1990 – Annex A1.4 limits for deflections should be specified for each project and agreed with the owner of the project.

ДОДАТОК А
(обов'язковий)
**ВИРАЗИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ
ОБОЛОНОК НА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ**

ANNEX A
[normative]
**EXPRESSIONS FOR SHELL BUCKLING
ANALYSIS**

A.1 Непідсилені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки

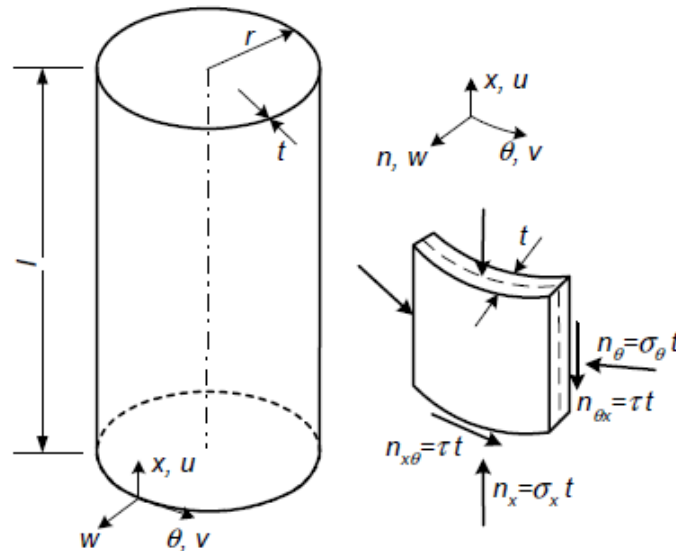
A.1 Unstiffened cylindrical shells of constant wall thickness

A.1.1 Позначення та граничні умови

A.1.1 Notations and boundary conditions

(1) Геометричні величини (Рис. А.1):

(1) General quantities (Figure A.1):



- l довжина циліндра між закріпленнями;
cylinder length between boundaries;
 r радіус середньої поверхні циліндра;
radius of cylinder middle surface;
 t товщина оболонки;
thickness of shell:

Рисунок А.1 – Геометрія циліндра, мембранні та результуючі напруження

Figure A.1 – Cylinder geometry and membrane stresses and stress resultants

(2) Відповідні граничні умови приводяться в пунктах 5.2 та 6.2.1.

(2) The boundary conditions are set out in 5.2 and 6.2.1.

A.1.2 Меридіональний (осьовий) стиск

A.1.2 Meridional (axial) compression

(1) Циліндри дозволяється не перевіряти на меридіональний стиск при втраті стійкості, якщо задовільняється умова:

(1) Cylinders need not be checked against meridional shell buckling if they satisfy:

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

A.1.2.1 Критичні меридіональні напруження при втраті стійкості

A.1.2.1 Critical meridional buckling stresses

(1) Наступні формули справедливі тільки для оболонок із граничними

(1) The following expressions may only be used for shells with boundary conditions BC 1

умовами BC 1 або BC 2 на обох гранях.

or BC 2 at both edges.

(2) Довжина сегмента оболонки характеризується параметром безрозмірної довжини ω :

(2) The length of the shell segment is characterized in terms of the dimensionless parameter ω :

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

(3) Критичне меридіональне напруження при втраті стійкості з використанням значення C_x із Таблиці А.1, потрібно визначати як:

(3) The critical meridional buckling stress, using values of C_x from Table A.1, should be obtained from:

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

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

Table A.1 – Factor C_x for critical meridional buckling stress

Довжина циліндра Cylindrical shell	$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}$	Коефіцієнт C_x Factor C_x
Короткий Short	$\omega \leq 1,7$	$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2}$
Середній Medium-length	$1,7 < \omega < 0,5 \frac{r}{t}$	$C_x = 1$
Довгий Long	$\omega \geq 0,5 \frac{r}{t}$	$C_x = 1 - \frac{0,2}{C_{xb}} (2\omega \frac{t}{r} - 1)$ але/ but $C_x \geq 0,6$ значення C_{xb} див. Таблицю А.2 where C_{xb} is given in Table A.2

Таблиця А.2 – Параметр C_{xb} для врахування впливу граничних умов для довгих циліндрів

Table A.2 – Parameter C_{xb} for the effect of boundary conditions for long cylinder

Варіант Case	Край циліндра Cylinder end	Граничні умови Boundary condition	C_{xb}
1	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 1	6
2	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 2	3
3	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 2 BC 2	1

Примітка. BC 1 включає в себе BC1f та BC1r

NOTE: BC 1 includes both BC1f and BC1r

(4) Для довгих циліндрів, визначених у Таблиці А.1, і які відповідають умовам:

(4) For long cylinders as defined in Table A.1 that satisfy the additional conditions:

$$\frac{r}{t} \leq 150 \quad (\text{A.4})$$

i and

$$\frac{\omega t}{r} \leq 6$$

i and

$$500 \leq \frac{E}{f_0} \leq 1000$$

коефіцієнт C_{xb} може бути обчислений також як:

the factor C_{xb} may alternatively be obtained by:

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

де:

$C_{x,N}$ параметр для довгих циліндрів під дією осьового стиску, відповідно до Таблиці А.1;

where:

$C_{x,N}$ is the parameter for long cylinder in axial compression according to Table A.1;

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

$\sigma_{x,Ed}$ is the design value of the meridional stress ($\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,N,Ed} + \sigma_{x,M,Ed}$);

$\sigma_{x,N,Ed}$ компонента напруження, яка визначається із осьового стиску (компонента рівномірна по колу);

$\sigma_{x,N,Ed}$ is the stress component from axial compression (circumferentially uniform component);

$\sigma_{x,M,Ed}$ компонента напруження, яка визначається із загального згину (пікове значення змінної по колу компоненти).

$\sigma_{x,M,Ed}$ is the stress component from tubular global bending (peak value of the circumferentially varying component).

A.1.2.2 Меридіональний коефіцієнт втрати стійкості

A.1.2.2 Meridional buckling parameter

(1) Коефіцієнт меридіонального дефекту потрібно визначати як:

(1) The meridional imperfection factor should be obtained from:

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6E}{f_0}} (\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_{x,0}) \right)^{1,44}} \quad (\text{A.6})$$

але:

but:

$$\alpha_x \leq 1,00$$

де:

where:

$\bar{\lambda}_{x,0}$ коефіцієнт меридіональної гнучкості стиснутого елемента;

$\bar{\lambda}_{x,0}$ is the meridional squash limit slenderness parameter;

Q параметр допуску по меридіональному стиску.

Q is the meridional compression tolerance parameter.

(2) Параметр допуску Q потрібно брати із Таблиці А.3 по обумовленому класу допуску. Для 4 класу допуску параметр Q залежить також від граничних умов, що визначаються за Таблицею 5.1.

(3) Коефіцієнт сплаву і коефіцієнт меридіональної гнучкості стиснутого елемента обираються за Таблицею А.4 в залежності від класу гнучкості матеріалу, що визначається за EN 1999-1-1.

(2) The tolerance parameter Q should be taken from Table A.3 for the specified tolerance class. For tolerance class 4 the tolerance parameter Q depends also on boundary conditions as defined in Table 5.1.

(3) The alloy factor and the meridional squash limit slenderness parameter should be taken from Table A.4 according to the material buckling class as defined in EN 1999-1-1.

Таблиця А.3 – Параметр допуску Q
Table А.3 – Tolerance parameter Q

Клас допуску Tolerance class	Значення Q для різних граничних умов Value of Q for boundary conditions	
	BC1r, BC2r	BC1f, BC2f
Клас 1/Class 1	16	
Клас 2/Class 2	25	
Клас 3/Class 3	40	
Клас 4/Class 4	60	50

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

Table А.4 – Values of $\bar{\lambda}_{x,0}$ and μ_x for meridional compression

Клас втрати стійкості матеріалу Material buckling class	$\bar{\lambda}_{x,0}$	μ_x
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

(4) Для довгих циліндрів, які відповідають умовам А.1.2.1 (4), коефіцієнт меридіональної гнучкості стиснутого елемента $\bar{\lambda}_{x,0}$ можна визначити за:

(4) For long cylinders that satisfy the special conditions of А.1.2.1(4), the meridional squash limit slenderness parameter may be obtained from:

$$\bar{\lambda}_{x,0,1} = \bar{\lambda}_{x,0} + 0,10 \frac{\sigma_{x,M,Ed}}{\sigma_{x,Ed}} \quad (A.7)$$

де:

$\bar{\lambda}_{x,0}$ слід брати з Таблиці А.4, а $\sigma_{x,Ed}$ та $\sigma_{x,M,Ed}$ за пунктом А.1.2.1(4).

where:

$\bar{\lambda}_{x,0}$ should be taken from Table A.4 and $\sigma_{x,Ed}$ and $\sigma_{x,M,Ed}$ are as given in А.1.2.1(4).

А.1.3 Кільцевий стиск (обруч)

А.1.3 Circumferential (hoop) compression

(1) Циліндри дозволяється не перевіряти на кільцевий стиск при втраті стійкості, якщо задовільняється умова:

(1) Cylinders need not be checked against circumferential shell buckling if they satisfy:

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

A.1.3.1 Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості

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

(2) Довжину сегмента оболонки потрібно характеризувати залежно від безрозмірного параметра довжини ω :

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

(3) Критичне меридіональне напруження при втраті стійкості з використанням значення C_θ із Таблиці А.5 для циліндрів середньої довжини та Таблиці А.6 для коротких циліндрів, потрібно визначати як:

A.1.3.1 Critical circumferential buckling stresses

(1) The following expressions may be applied to shells with all boundary conditions.

(2) The length of the shell segment is characterized in terms of the dimensionless parameter ω :

(3) The critical meridional buckling stress, using values of C_θ from Table A.5 for medium length cylinders and Table A.6 for short cylinders, should be obtained from:

$$\sigma_{\theta,cr} = 0,92E \frac{C_\theta}{\omega} \frac{t}{r} \quad (\text{A.10})$$

Таблиця А.5 – Коефіцієнти напруження при втраті стійкості C_θ при дії зовнішнього тиску для циліндрів середньої довжини ($20 < \omega / C_\theta < 1,63r / t$)

Table A.5 – External pressure buckling factor C_θ for medium-length cylinders ($20 < \omega / C_\theta < 1,63r / t$)

Варіант Case	Край циліндра Cylinder end	Граничні умови Boundary condition	Коефіцієнт C_θ Factor C_θ
1	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 1	1,5
2	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 2	1,25
3	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 2 BC 2	1,0
4	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 3	0,6
5	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 2 BC 3	0
6	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 3 BC 3	0

Таблиця А.6 – Коефіцієнти напруження при втраті стійкості C_θ при дії зовнішнього тиску для коротких циліндрів ($\omega / C_\theta \leq 20$)

Table A.6 – External pressure buckling factor C_θ for short cylinders ($\omega / C_\theta \leq 20$)

Варіант Case	Край циліндра Cylinder end	Граничні умови Boundary condition	Коефіцієнт C_θ Factor C_θ
1	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 1	$C_\theta = 1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 2	$C_\theta = 1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 2 BC 2	$C_\theta = 1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	край 1 (end 1) край 2 (end 2)	BC 1 BC 3	$C_\theta = 0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$

Примітка. У Таблицях А.5 і А.6 BC 1 включає в себе BC1f та BC1r

NOTE: In Table A.5 and A.6, BC 1 includes both BC1f and BC1r

(4) Для довгих циліндрів ($\omega / C_\theta \geq 1,63r / t$) кільцеві напруження при втраті стійкості слід визначати за формулою:

(4) For long cylinders ($\omega / C_\theta \geq 1,63r / t$) the circumferential buckling stress should be obtained from:

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

A.1.3.2 Кільцеві коефіцієнти втрати стійкості

A.1.3.2 Circumferential buckling parameter

(1) Коефіцієнт меридіональної недосконалості визначається за:

(1) The meridional imperfection factor should be obtained from:

$$\alpha_\theta = \frac{1}{1 + 0,2(1 - \alpha_{\theta,ref})(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_{\theta,0}) / a_{\theta,ref}^2} \quad (A.12)$$

але:

but:

$$a_\theta \leq 1,00$$

(2) Коефіцієнт відносної кільцевої недосконалості $\alpha_{\theta,ref}$ обирається з Таблиці А.7 для конкретного класу допуску.

(2) The circumferential reference imperfection factor $\alpha_{\theta,ref}$ should be taken from Table A.7 for the specified tolerance class.

Таблиця А.7 – Значення коефіцієнта $\alpha_{\theta,ref}$ в залежності від класу допуску

Table A.7 – Factor $\alpha_{\theta,ref}$ based on tolerance class

Клас допуску Tolerance class	Параметр $\alpha_{\theta,ref}$ Parameter $\alpha_{\theta,ref}$
Клас 1/Class 1	0,50
Клас 2/Class 2	0,65
Класи 3 та 4/Class 3 and 4	0,75

(3) Коефіцієнт сплаву і коефіцієнт меридіональної гнучкості стиснутого елемента обираються за Таблицею А.8 в залежності від класу гнучкості матеріалу, що визначається за EN 1999-1-1.

(3) The alloy factor and the meridional squash limit slenderness parameter should be taken from Table A.8 according to the material buckling class as defined in EN 1999-1-1.

Таблиця А.8 – Значення $\bar{\lambda}_{x,0}$ та μ_{θ} для випадку кільцевого стиску

Table А.8 – Values of $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ and μ_{θ} for circumferential compression

Клас втрати стійкості матеріалу Material buckling class	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
А	0,30	0,55
В	0,20	0,70

(4) Нерівномірний розподіл тиску q_{eq} , який виникає від зовнішнього вітрового навантаження на циліндри (див. Рисунок А.2) можна, для розрахунку втрати стійкості, замінити еквівалентним рівномірним зовнішнім тиском:

(4) The non-uniform distribution of pressure q_{eq} resulting from external wind loading on cylinders (see Figure A.2) may, for the purpose of shell buckling design, be substituted by an equivalent uniform external pressure:

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

де:

where:

$q_{w,max}$ – максимальний вітровий тиск, а k_w визначається наступним чином:

$q_{w,max}$ is the maximum wind pressure and k_w should be found as follows:

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

із значенням k_w , яке знаходиться в межах $0,65 \leq k_w \leq 1,0$, значення C_{θ} потрібно брати з Таблиці А.5 відповідно до граничних умов.

with the value of k_w not outside the range $0,65 \leq k_w \leq 1,0$, and with C_{θ} taken from Table A.5 according to the boundary conditions.

(5) Проектне кільцеве напруження, введене в 6.2.3.3, визначається з:

(5) The circumferential design stress to be introduced into 6.2.3.3 follows from:

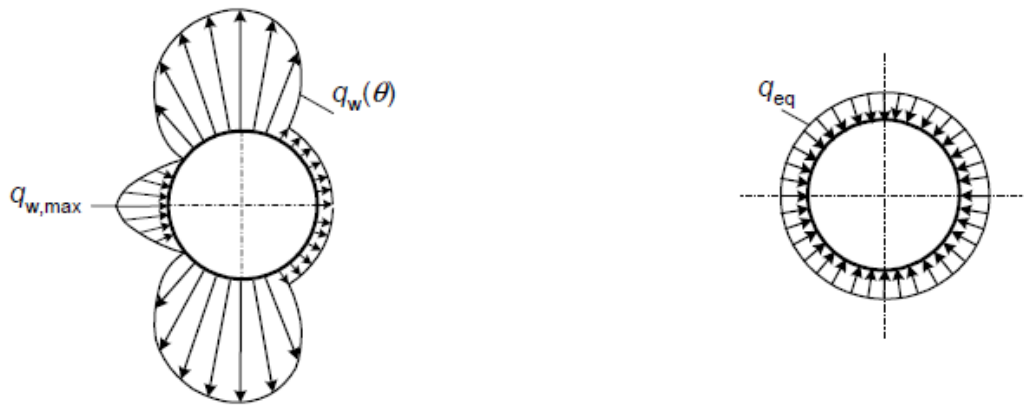
$$\sigma_{\theta,Ed} = (q_{eq} + q_s) \frac{r}{t} \quad (A.15)$$

де:

where:

q_s – внутрішній відсос, що спричиняється дією повітря, внутрішнім частковим розрідженням або іншим явищем.

q_s is the internal suction caused by venting, internal partial vacuum or other phenomena.



a) Розподіл вітрового тиску навколо оболонки

a) Wind pressure distribution around shell circumference

b) Розподіл еквівалентного вісесиметричного тиску

b) Equivalent axisymmetric pressure distribution

Рисунок А.2 – Перетворення типового розподілу зовнішнього вітрового тиску

Figure А.2 – Transformation of typical wind external pressure load distribution

A.1.4 Зсув

(1) Циліндри дозволяється не перевіряти на зсув при втраті стійкості, якщо задовільняється умова:

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

A.1.4 Shear

(1) Cylinders need not be checked against shear buckling if they satisfy:

A.1.4.1 Критичні дотичні напруження при втраті стійкості

(1) Наступні вирази потрібно застосовувати тільки для оболонок із граничними умовами BC1 або BC2 на обох краях.

(2) Довжина сегмента оболонки характеризується залежно від безрозмірного параметра довжини ω :

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

(3) Критичне дотичне напруження при втраті стійкості з використанням значення C_τ із Таблиці А.9 потрібно визначати як:

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

A.1.4.1 Critical shear buckling stresses

(1) The following expressions may only be used for shells with boundary conditions BC 1 or BC 2 at both edges.

(2) The length of the shell segment is characterized in terms of the dimensionless parameter ω :

(3) The critical shear buckling stress, using values of C_τ from Table A.9, should be obtained from:

Таблиця А.9 – Коефіцієнт C_τ для критичних дотичних напружень при втраті стійкості

Table A.9 – Factor C_τ for critical shear buckling stress

Довжина циліндра Cylindrical shell	$\omega \leq \frac{l}{\sqrt{rt}}$	Коефіцієнт C_τ Factor C_τ
Короткий Short	$\omega \leq 10$	$C_\tau = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}}$
Середньої довжини Medium-length	$10 < \omega < 8,7 \frac{r}{t}$	$C_\tau = 1$
Довгий Long	$\omega \geq 8,7 \frac{r}{t}$	$C_\tau = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\omega \tau}{r}}$

A.1.4.2 Коефіцієнти втрати стійкості у випадку зсуву

втрати

A.1.4.2

Shear buckling parameters

(1) Коефіцієнт недосконалості у випадку зсуву визначається як:

(1) The shear imperfection factor should be obtained from:

$$\alpha_\tau = \frac{1}{1 + 0.2(1 - \alpha_{\tau,ref})(\bar{\lambda}_\tau - \bar{\lambda}_{\tau,0}) / \alpha_{\tau,ref}^2} \quad (\text{A.19})$$

але

but

$$a_\tau \leq 1,00$$

(2) Коефіцієнт недосконалості у випадку зсуву $\alpha_{\tau,ref}$ обирається з Таблиці А.10 в залежності від класу допуску

(2) The shear imperfection factor $\alpha_{\tau,ref}$ should be taken from Table A.10 for the specified tolerance class.

Таблиця А.10 – Значення коефіцієнта $\alpha_{\tau,ref}$ в залежності від класу допуску

Table A.10 – Factor $\alpha_{\tau,ref}$ based on tolerance

Клас допуску Tolerance class	Коефіцієнт $\alpha_{\tau,ref}$ Parameter $\alpha_{\tau,ref}$
Клас 1/Class 1	0,50
Клас 2/Class 2	0,65
Класи 3 та 4/Class 3 and 4	0,75

(3) Коефіцієнт сплаву і коефіцієнт меридіональної гнучкості стиснутого елемента обираються за Таблицею А.11 в залежності від класу втрати стійкості матеріалу, що визначається за EN 1999-1-1.

(3) The alloy factor and the meridional squash limit slenderness parameter should be taken from Table A.11 according to the material buckling class as defined in EN 1999-1-1.

Таблиця А.11 – Значення $\bar{\lambda}_{\tau 0}$ та μ_{τ} для зсуву

Table A.11 – Values of $\bar{\lambda}_{\tau 0}$ and μ_{τ} for shear

Клас втрати стійкості матеріалу Material buckling class	$\bar{\lambda}_{\tau 0}$	μ_{τ}
A	0,50	0,30
B	0,40	0,40

A.1.5 Меридіональний (осьовий) тиск із внутрішнім тиском

A.1.5 Meridional (axial) compression with coexistent internal pressure

A.1.5.1 Критичне меридіональне напруження при втраті стійкості під дією тиску

A.1.5.1 Pressurised critical meridional buckling stress

(1) Критичне напруження при втраті стійкості $\sigma_{x,cr}$ можна визначати без урахування внутрішнього тиску і отримати з А.1.2.1.

(1) The critical meridional buckling stress $\sigma_{x,cr}$ may be assumed to be unaffected by the presence of internal pressure and may be obtained as specified in A.1.2.1.

A.1.5.2 Коефіцієнти меридіональної втрати стійкості під дією тиску

A.1.5.2 Pressurised meridional buckling parameters

(1) Напруження меридіональної втрати стійкості під дією тиску потрібно перевіряти аналогічно до такого ж параметра, але без дії тиску, як вказано у 6.2.3.3 і А.1.2.2. Проте коефіцієнт зменшення пружної деформації α_x без тиску потрібно замінити цим же коефіцієнтом, але з урахуванням тиску $\alpha_{x,p}$.

(1) The pressurised meridional buckling strength should be verified analogously to the unpressurised meridional buckling strength as specified in 6.2.3.3 and A.1.2.2. However, the unpressurised imperfection factor α_x may be replaced by the pressurised imperfection factor $\alpha_{x,p}$.

(2) Коефіцієнт недосконалості під дією тиску $\alpha_{x,p}$ потрібно брати меншим із двох значень:

(2) The pressurised imperfection factor $\alpha_{x,p}$ should be taken as the smaller of the two following values:

$\alpha_{x,pe}$ – коефіцієнт, що враховує пружну стабілізацію, спричинену тиском;

$\alpha_{x,pe}$ is a factor covering pressure-induced elastic stabilisation;

$\alpha_{x,pp}$ – коефіцієнт, що враховує пластичну дестабілізацію, спричинену тиском.

$\alpha_{x,pp}$ is a factor covering pressure-induced plastic destabilisation.

(3) Коефіцієнт $\alpha_{x,pe}$ потрібно визначати із:

(3) The factor $\alpha_{x,pe}$ should be obtained from:

$$\alpha_{x,pe} = \alpha_x + (1 - \alpha_x) \frac{\bar{p}}{p + 0,3 / \alpha_x^{0,5}} \quad (\text{A.20})$$

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{x,cr}} \quad (\text{A.21})$$

де:

\bar{p} найменше значення місцевого внутрішнього тиску в точці, що розглядається, який діє сумісно із меридіональним стиском;

α_x коефіцієнт меридіональної недосконалості без урахування тиску відповідно до А.1.2.2;

$\sigma_{x,cr}$ пружне критичне меридіональне напруження при втраті стійкості відповідно до А.1.2.1 (3).

(4) Коефіцієнт $\alpha_{x,pe}$ не потрібно застосовувати до довгих циліндрів відповідно до А.1.2.1 (3), Таблиця А.1.

Крім того, його не потрібно застосовувати, якщо:

- циліндр має середню довжину, відповідно до А.1.2.1 (4);

- циліндр короткий, відповідно до А.1.2.1(3), Таблиця А.1 і в А.1.2.1(3) було прийнято $C_x = 1$.

(5) Коефіцієнт $\alpha_{x,pp}$ потрібно визначати як:

$$\alpha_{x,pp} = \left(1 - \frac{p^{-2}}{\lambda_x^{-4}}\right) \left(1 - \frac{1}{1,12 + s^{1,5}}\right) \frac{s^2 + 1,21\bar{\lambda}_x^{-2}}{s(s+1)} \quad (\text{A.22})$$

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{x,cr}} \quad (\text{A.23})$$

$$s = \frac{r}{400t} \quad (\text{A.24})$$

де:

\bar{p} найбільше значення локального внутрішнього тиску в розрахунковій точці, з можливим одночасним меридіональним стиском;

$\bar{\lambda}_x$ безрозмірний параметр гнучкості стиснутої оболонки відповідно до 6.2.3.2(3);

where:

\bar{p} is the smallest value of internal pressure at the location of the point being assessed, and guaranteed to coexist with the meridional compression;

α_x is the unpressurised meridional imperfection factor according to A.1.2.2;

$\sigma_{x,cr}$ is the elastic critical meridional buckling stress according to A.1.2.1(3).

(4) The factor $\alpha_{x,pe}$ should not be applied to cylinders that are long according to A.1.2.1(3), Table A.1.

Further, it should not be applied unless:

- the cylinder is medium-length according to A.1.2.1(3), Table A.1;

- the cylinder is short according to A.1.2.1(3), Table A.1 and $C_x = 1$ has been adopted in A.1.2 1(3).

(5) he factor $\alpha_{x,pp}$ should be obtained from:

where:

\bar{p} is the largest value of internal pressure at the location of the point being assessed, and possibly coexistent with the meridional compression;

$\bar{\lambda}_x$ is the non-dimensional shell slenderness parameter according to 6.2.3.2 (3);

$\sigma_{x,cr}$ пружне критичне меридіональне напруження при втраті стійкості відповідно до А.1.2.1(3).

A.1.6 Сумісна дія меридіонального (осьового) тиску, кільцевого тиску і зсуву

(1) Параметри взаємодії втрати стійкості для використання в 6.2.3.3(3) можна отримати із:

$$k_x = 1,25 + 0,75\chi_x$$

$$k_\theta = 1,25 + 0,75\chi_\theta \tag{A.25}$$

$$k_\tau = 1,25 + 0,75\chi_\tau$$

$$k_i = (\chi_x\chi_\theta)^2$$

де:

χ_x , χ_θ , χ_τ – коефіцієнти зменшення втрати стійкості, визначені в 6.2.3.2, з використанням параметрів втрати стійкості, наведених у А.1.2 – А.1.4.

(2) Вважається, що три компоненти мембранного напруження взаємодіють у всіх точках оболонки за винятком точок, які прилягають до границь. Перевіркою на сумісну дію можна знехтувати для всіх точок, що знаходяться в межах довжини граничної зони l_s , яка прилягає до будь-якої грані циліндричного сегмента. Значення l_s є меншим із:

$$l_s = 0,1L \text{ та (and) } l_s = 0,16r\sqrt{r/t} \tag{A.26}$$

(3) Якщо спільно виконати перевірку сумісної втрати стійкості в усіх точках, то можна користуватися простішим традиційним методом, наведеним у наступних положеннях (4) і (5). Якщо максимальне значення будь-якого мембранного напруження виникає у межах граничної зони l_s , яка прилягає до будь-якої грані циліндра, перевірка сумісної дії відповідно до 6.2.3.3(3) може бути виконана з використанням значень, визначених у (4).

(4) Якщо виконуються умови положення (3), максимальне значення

$\sigma_{x,cr}$ is the elastic critical meridional buckling stress according to A.1.2.1(3).

A.1.6 Combinations of meridional (axial) compression, circumferential (hoop) compression and shear

(1) The buckling interaction parameters to be used in 6.2.3.3(3) may be obtained from:

where:

χ_x , χ_θ and χ_τ are the buckling reduction factors defined in 6.2.3.2, using the buckling parameters given in A.1.2 to A.1.4.

(2) The three membrane stress components should be deemed to interact in combination at any point in the shell, except those adjacent to the boundaries. The buckling interaction check may be omitted for all points that lie within the boundary zone length l_s adjacent to either end of the cylindrical segment. The value of l_s is the smaller of:

(3) If checks of the buckling interaction at all points are found to be onerous, the following provisions of (4) and (5) permit a simpler conservative assessment. If the maximum value of any of the buckling-relevant membrane stresses in a cylindrical shell occurs in a boundary zone of length l_s adjacent to either end of the cylinder, the interaction check of 6.2.3.3(3) may be undertaken using the values defined in (4).

(4) If the conditions of (3) are met, the maximum value of any of the buckling-

кожного мембранного напруження, зв'язаного з втратою стійкості, яке виникає не в межах вільної довжини l_f (за межами граничних зон, див. Рисунок А.3а), можна використовувати для перевірки сумісної дії за 6.2.3.3 (3), де:

$$l_f = L - 2l_s \quad (\text{A.27})$$

(5) Для довгих циліндрів, за А.1.2.1(3), групи, що мають відношення до сумісної дії і підлягають перевірці на сумісну дію, можуть бути обмежені більше ніж цього вимагають параграфи (3) і (4). Припускається, що напруження, які входять до груп сумісної дії, можна обмежити будь-яким відрізком завдовжки l_{int} , розміщеним у межах l_f для перевірки сумісної дії(див. Рисунок А.3б), де:

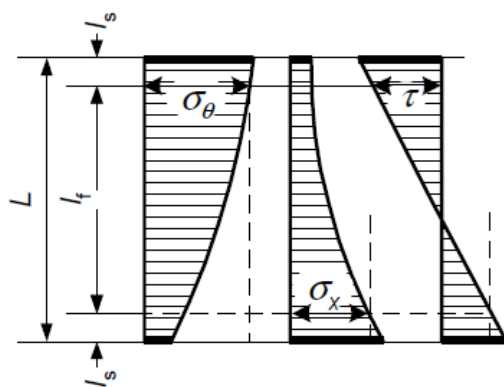
$$l_{int} = 1,3r\sqrt{r/t} \quad (\text{A.28})$$

(6) Якщо в параграфах (3) – (5) не наводяться особливі положення щодо визначення відносного розміщення або розділення груп компонентів мембранного напруження сумісної дії і все ще потрібен простий і консервативний підхід, максимальне значення кожного мембранного напруження, незалежно від розміщення на оболонці, може бути використаним у формулі (6.24).

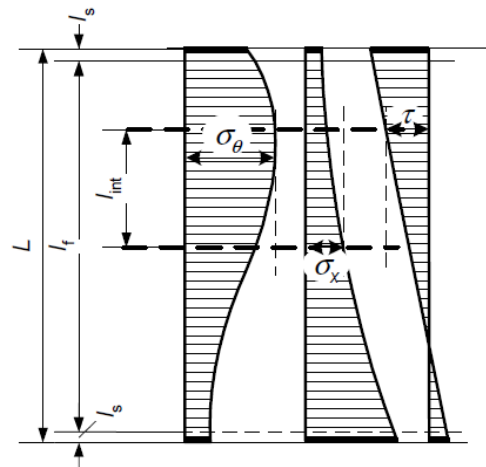
relevant membrane stresses occurring over the free length l_f that is outside the boundary zones (see Figure A.3a) may be used in the interaction check of 6.2.3.3 (3), where:

(5) For long cylinders as defined A.1.2.1(3), Table A.1, the interaction-relevant groups introduced into the interaction check may be restricted further than the provisions of paragraphs (3) and (4). The stresses deemed to be in interaction-relevant groups may then be restricted to any section of length l_{int} falling within the free remaining length l_f for the interaction check (see Figure A.3b), where:

(6) If (3) to (5) above do not provide specific provisions for defining the relative locations or separations of interaction-relevant groups of membrane stress components, and a simple conservative treatment is still required, the maximum value of each membrane stress, irrespective of location in the shell, may be adopted into expression (6.24).



а) короткий циліндр
a) short cylinder



б) довгий циліндр
b) long cylinder

Рисунок А.3 – Приклади груп сумісної дії за компонентами мембранних напружень
Figure A.3 – Examples of interaction-relevant groups of membrane stress components

A.2 Непідсилені циліндричні оболонки зі ступінчастою змінною товщиною стінки

A.2.1 Загальні положення

A.2.1.1 Позначення і граничні умови

(1) У даному розділі використовуються наступні позначення:

L загальна довжина циліндра;

r радіус серединної поверхні циліндра;

j цілий показник, який вказує на окремі секції циліндра з постійною товщиною стінки (від $j=1$ до $j=n$);

t_j постійна товщина стінки секції j даного циліндра;

l_j довжина секції j циліндра.

(2) Наступні вирази справедливі тільки для оболонок із граничними умовами BC 1 або BC 2 на обох кінцях (see 5.2), без урахування різниці між ними.

A.2.1.2 Геометрія і зміщення стиків

(1) Якщо товщина стінки циліндра збільшується поступово і ступінчасто зверху до низу (див. рисунок A.4a), можна застосовувати методіку, наведену в цьому розділі. В якості альтернативного підходу, для визначення критичного кільцевого напруження при втраті стійкості $\sigma_{\theta,cr,eff}$ можна використати лінійний пружний розрахунок біфуркації (ЛРБ), див A.2.3.1(7).

(2) Намічені зміщення e_0 між пластинами суміжних секцій (див. рисунок D.4) можна розглядати як прогнозовані наступними формулами за умови, що намічене значення e_0 менше допустимого значення $e_{0,p}$, яке приймається як менше із:

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

де:

t_{\max} товщина товстішої стінки з'єднання;

A.2 Unstiffened cylindrical shells of stepwise wall thickness

A.2.1 General

A.2.1.1 Notations and boundary conditions

(1) In this clause the following notations are used:

L overall cylinder length between boundaries;

r radius of cylinder middle surface;

j an integer index denoting the individual cylinder sections with constant wall thickness (from $j=1$ to $j=n$);

t_j the constant wall thickness of section j of the cylinder;

l_j the length of section j of the cylinder.

(2) The following expressions may only be used for shells with boundary condition BC 1 and BC 2 at both edges (see 5.2), with no distinction made between them.

A.2.1.2 Geometry and joint offsets

(1) Provided that the wall thickness of the cylinder increases progressively stepwise from top to bottom (see figure A.4a), the procedures given in this clause may be used. Alternatively, linear elastic bifurcation analysis LBA may be used to calculate the critical circumferential buckling stress $\sigma_{\theta,cr,eff}$ in A.2.3.1(7).

(2) Intended offsets e_0 between plates of adjacent sections (see Figure A.4) may be treated as covered by the following expressions provided that the intended value e_0 is less than the permissible value $e_{0,p}$ which should be taken as the smaller of:

where:

t_{\max} is the thickness of the thicker plate at

t_{\min} товщина тоншої стінки з'єднання.

(3) Для циліндрів із прогнозованими зміщеннями між суміжними секціями відповідно до (2), радіус r можна брати як середнє значення всіх секцій.

(4) Для циліндрів зі з'єднаннями внапуск потрібно використовувати положення, наведені в параграфі А.3.

the joint;

t_{\min} is the thickness of the thinner plate at the joint.

(3) For cylinders with permissible intended offsets between plates of adjacent sections according to (2), the radius r may be taken as the mean value of all sections.

(4) For cylinders with overlapping joints (lap joints), the provisions for lap-jointed construction given in A.3 should be used.

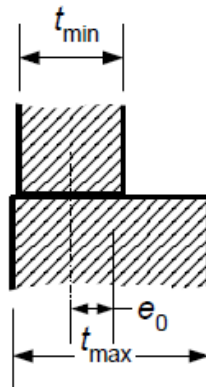


Рисунок А.4 – Прогнозоване зміщення e_0 в оболонці, яка з'єднана внапуск
Figure A.4 – Intended offset e_0 in a butt-jointed shell

A.2.2 Меридіональний (осьовий) стиск

(1) Кожну секцію циліндра j завдовжки l_j потрібно розглядати як еквівалентний циліндр із загальною довжиною $l = L$ і з постійною товщиною стінки $t = t_j$ відповідно до А.1.2.

(2) Для довгих еквівалентних циліндрів, визначених у А.1.2.1(3), Таблиця А.1, параметр C_{xb} потрібно приймати як $C_{xb} = 1$, якщо краще значення не визначене більш детальним розрахунком.

A.2.2 Meridional (axial) compression

(1) Each cylinder section j of length l_j should be treated as an equivalent cylinder of overall length $l = L$ and uniform wall thickness $t = t_j$ according to A.1.2.

(2) For long equivalent cylinders, as governed by A.1.2.1(3), Table A.1, the parameter C_{xb} should be conservatively taken as $C_{xb} = 1$, unless a better value is justified by more rigorous analysis.

A.2.3 Кільцевий стиск (обруч)

A.2.3.1 Критичні кільцеві напруження при втраті стійкості

(1) Якщо циліндр складається із трьох секцій з різними товщинами стінок, потрібно застосовувати методика, описану в (4)–(7), див. Рисунок А.5(II).

(2) Якщо циліндр складається тільки із однієї секції (тобто має постійну товщину стінки), потрібно застосовувати положення

A.2.3 Circumferential (hoop) compression

A.2.3.1 Critical circumferential buckling stresses

(1) If the cylinder consists of three sections with different wall thickness, the procedure according to (4) to (7) should be applied, see Figure A.5(II)

(2) If the cylinder consists of only one section (i.e. constant wall thickness), A.1

A.1.

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

(4) Якщо циліндр складається більше ніж із трьох секцій із різною товщиною стінок (див. рисунок A.5(I)), то спочатку його потрібно замінити еквівалентним циліндром, до якого входять три секції a , b і c (див. рисунок A.5(II)). Довжина верхньої секції l_a повинна продовжуватися до верхнього краю першої секції, товщина якої в 1,5 раза більша ніж найменша товщина стінки t_j , але не більше половини загальної довжини циліндра L . Довжину двох інших секцій l_b і l_c потрібно визначати наступним чином:

$$l_b = l_a \text{ та (and) } l_c = L - 2l_a \quad (\text{A.30})$$

якщо

if

$$l_a \leq L/3$$

$$l_b = l_c = 0,5(L - l_a)$$

(A.31)

якщо

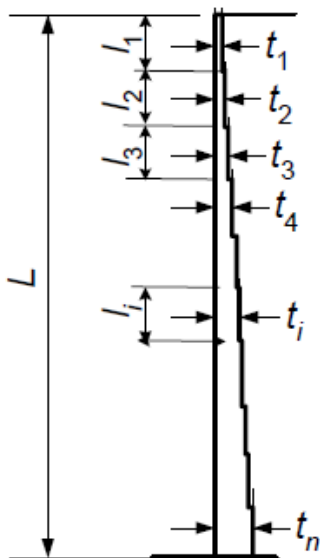
if

$$L/3 < l_a \leq L/2$$

should be applied.

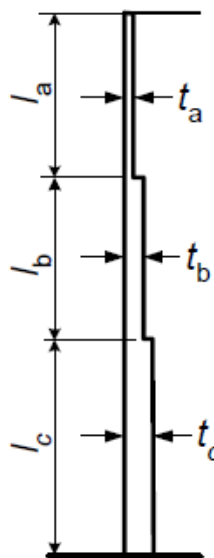
(3) If the cylinder consists of two sections of different wall thickness, the procedure of (4) to (7) should be applied, treating two of the three fictitious sections, a and b , as being of the same thickness.

(4) If the cylinder consists of more than three sections with different wall thicknesses (see Figure A.5(I)), it should first be replaced by an equivalent cylinder comprising three sections a , b and c (see Figure A.5(II)). The length of its upper section, l_a , should extend to the upper edge of the first section that has a wall thickness greater than 1,5 times the smallest wall thickness t_j , but should not comprise more than half the total length L of the cylinder. The length of the two other sections l_b and l_c should be obtained as follows:



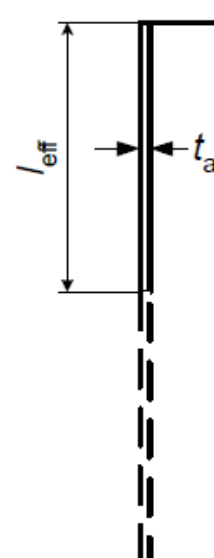
(I) Циліндр зі ступінчато змінною товщиною стінки

(I) Cylinder of stepwise



(II) Еквівалентний циліндр, що складається із трьох секцій

(II) Equivalent cylinder



(III) Еквівалентний простий циліндр із однаковою товщиною стінок

(III) Equivalent single cylinder

Рисунок А.5 – Перетворення ступінчастого циліндра в еквівалентний циліндр
Figure A.5 – Transformation of stepped cylinder into equivalent cylinder

(5) Фіктивні товщини стінок t_a , t_b і t_c трьох секцій потрібно визначати як середньозважене значення товщини стінок по кожній із трьох фіктивних секцій:

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

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

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

(6) Трисекційний циліндр (тобто еквівалентний або реальний циліндр) потрібно замінити еквівалентним простим циліндром із ефективною довжиною l_{eff} і з однаковою товщиною стінок $t = t_a$, (див. Рисунок А.5(III)). Ефективна довжина визначається наступним чином:

$$l_{eff} = \frac{l_a}{\kappa} \quad (\text{A.35})$$

де:

κ безрозмірний коефіцієнт, отриманий з Рисунка А.6.

(7) Для секцій циліндра середньої довжини або коротких критичне кільцеве напруження при втраті стійкості кожної секції циліндра j вихідного циліндра із ступінчасто змінною товщиною стінки потрібно визначати за наступним виразом:

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

де:

$\sigma_{\theta,Rcr,eff}$ критичне кільцеве напруження при втраті стійкості, отримане відповідно з А.1.3.1(3), А.1.3.1(4), для еквівалентного одиничного циліндра завдовжки l_{eff} відповідно до параграфу (6). Коефіцієнт C_θ в цих виразах потрібно

(5) The fictitious wall thickness t_a , t_b and t_c of the three sections should be determined as the weighted average of wall thickness over each of the three fictitious sections:

(6) The three-section-cylinder (i.e. the equivalent one or real one respectively) should be replaced by an equivalent single cylinder of effective length l_{eff} and of uniform wall thickness $t = t_a$ (see Figure A.5(III)). The effective length should be determined from:

in which:

κ is a dimensionless factor obtained from Figure A.6.

(7) For cylinder sections of moderate or short length, the critical circumferential buckling stress of each cylinder section j of original cylinder of stepwise variable wall thickness should be determined from:

where:

$\sigma_{\theta,Rcr,eff}$ is the critical circumferential buckling stress derived from A.1.3.1(3) or A.1.3.1(4) as appropriate, of the equivalent single cylinder of length l_{eff} according to (6). The factor C_θ in these expressions should be

приймати $C_\theta = 1,0$.

given the value

$$C_\theta = 1,0.$$

(8) Довжина сегмента оболонки характеризується параметром безрозмірної величини ω_j :

(8) The length of the shell segment is characterised in terms of the dimensionless parameter ω_j :

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

(9) Якщо секція циліндра j довга, потрібно провести другу додаткову оцінку критичного напруження поздовжнього згину. Менше із двох значень, отриманих із (7) і (10), потрібно використовувати для перевірки проектного критичного напруження при втраті стійкості секції циліндра j .

(9) If the cylinder section j is long, a second additional assessment of the buckling stress should be made. The smaller of the two values derived from (7) and (10) should be used for the buckling design of the cylinder section j .

(10) Секцію циліндра j потрібно вважати довгою, якщо:

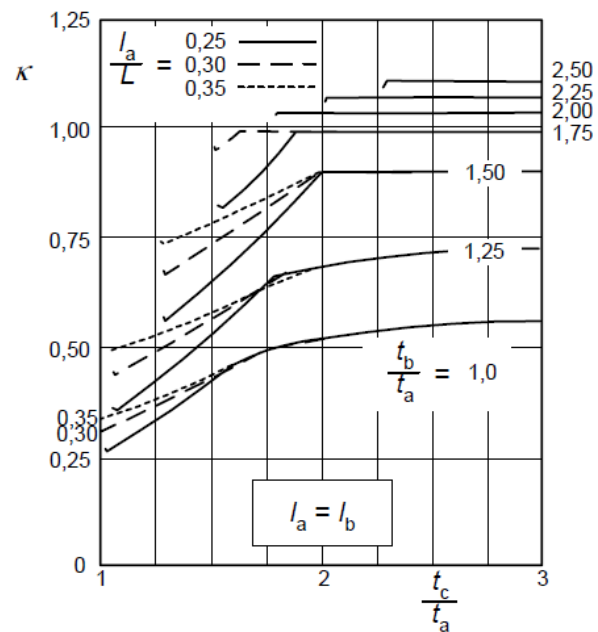
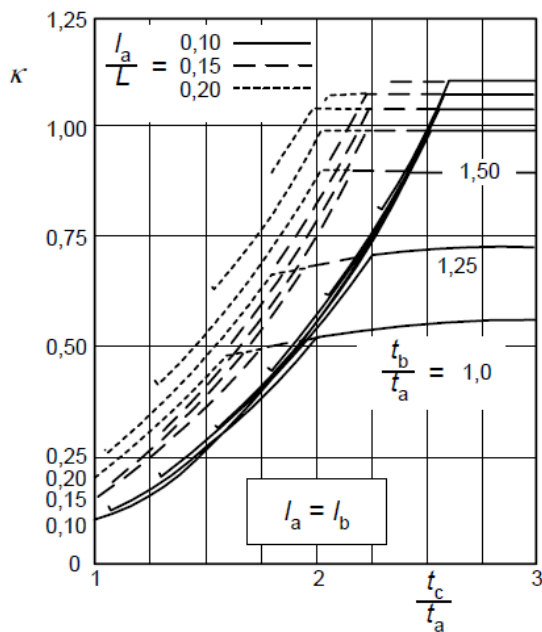
(10) The cylinder section j should be treated as long if:

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

у такому випадку критичне кільцеве напруження втрати стійкості потрібно визначати як:

in which case the critical circumferential buckling stress should be obtained from:

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



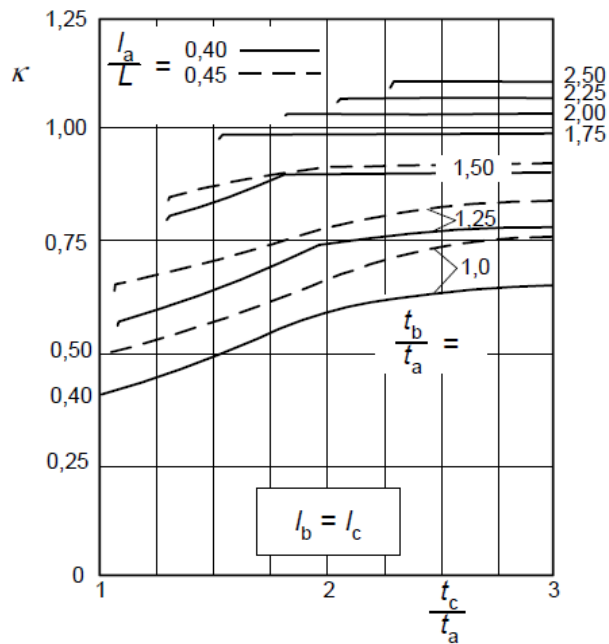


Рисунок А.6 – Коефіцієнт κ для визначення ефективної довжини l_{eff}

Figure A.6 – Factor κ for determining of the effective length l_{eff}

A.2.3.2 *Перевірка міцності втрати стійкості при кільцевому стиску*

(1) Для кожної секції циліндра j повинні виконуватися умови 8.5 і проводиться наступна перевірка:

$$\sigma_{\theta,Ed,j} \leq \sigma_{\theta,Rd,j} \tag{A.40}$$

де:

$\sigma_{\theta,Ed,j}$ визначальне значення мембранного кільцевого стискаючого напруження, як описано в наступних параграфах;

$\sigma_{\theta,Rd,j}$ розрахункове кільцеве напруження при втраті стійкості, отримане із пружного критичного кільцевого напруження при втраті стійкості відповідно до А.1.3.2.

(2) За умови, що розрахункове значення сумарного кільцевого напруження $n_{\theta,Ed}$ є постійним по всій довжині L , визначальне значення стискаючого мембранного кільцевого напруження в секції j потрібно брати як просте значення:

$$\sigma_{\theta,Ed,j} \leq \frac{n_{\theta,Ed}}{t_j} \tag{A.41}$$

A.2.3.2 *Buckling strength verification for circumferential compression*

(1) For each cylinder section j , the conditions of 6.2.3 should be met, and the following check should be carried out:

where:

$\sigma_{\theta,Ed,j}$ is the key value of the circumferential compressive membrane stress, as detailed in the following clauses;

$\sigma_{\theta,Rd,j}$ is the design circumferential buckling stress, as derived from the critical circumferential buckling stress according to A.1.3.2.

(2) Provided that the design value of the circumferential stress resultant $n_{\theta,Ed}$ is constant throughout the length L the key value of the circumferential compressive membrane stress in the section j , should be taken as the value:

(3) Якщо розрахункове значення сумарного кільцевого напруження $n_{\theta,Ed}$ змінюється на довжині L , то визначальне значення стискаючого мембранного кільцевого напруження потрібно брати як фіктивне значення $\sigma_{\theta,Ed,j,mod}$, визначене із максимального значення сумарного кільцевого напруження $n_{\theta,Ed}$ у будь-якому місці довжини L , поділене на місцеву товщину t_j (див. Рисунок А.7):

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

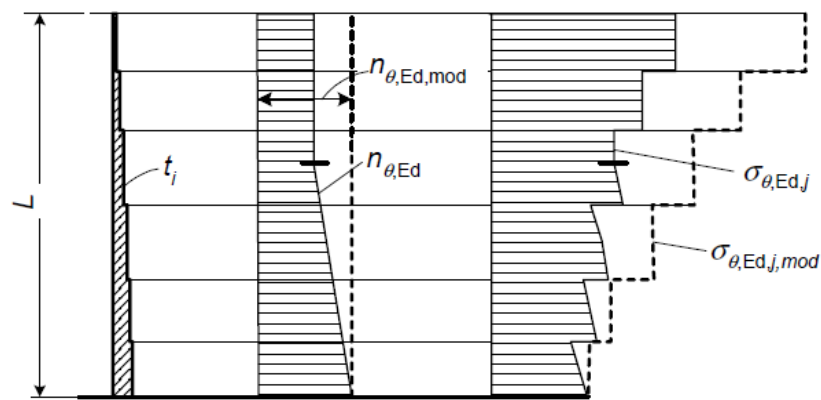


Рисунок А.7 – Визначальні значення стискаючого мембранного кільцевого напруження при $n_{\theta,Ed}$, змінному по довжині L

Figure А.7 – Key values of the circumferential compressive membrane stress in cases where $n_{\theta,Ed}$ varies within the length L

A.2.4 Зсув

A.2.4.1 Критичне дотичне напруження втрати стійкості

(1) Якщо немає спеціального правила для оцінки еквівалентного одиничного циліндра з рівномірною товщиною стінки, можна використовувати вирази А.2.3.1 (1)–(6).

(2) Наступне визначення критичного дотичного напруження втрати стійкості можна вираховувати, використовуючи вирази А.2.3.1 (7) – (10), при цьому замінюючи вираз А.1.3.1 для кільцевого стиску відповідним виразом для зсуву А.1.4.1.

A.2.4 Shear

A.2.4.1 Critical shear buckling stress

(1) If no specific rule for evaluating an equivalent single cylinder of uniform wall thickness is available, the expressions of А.2.3.1(1) to (6) may be applied.

(2) The further determination of the critical shear buckling stresses may on principle be performed as in А.2.3.1(7) to (10), but replacing the circumferential compression expressions from А.1.3.1 by the relevant shear expressions from А.1.4.1.

A.2.4.2 *Перевірка міцності на втрату стійкості при зсуві*

(1) Правила, наведені в D.2.3.2, можна використовувати, але необхідно замінити вираз кільцевого стиску відповідним виразом зсуву.

A.3 **Непідсилені циліндричні оболонки, з'єднані внапуск**

A.3.1 *Загальні положення*

A.3.1.1 *Визначення*

1. **кільцеве з'єднання внапуск**

З'єднання внапуск у кільцевому напрямку навколо осі оболонки.

2. **меридіональне з'єднання внапуск**

З'єднання внапуск паралельно осі оболонки (меридіональний напрямок).

A.3.1.2 *Геометрія та результуючі напруження*

(1) Якщо циліндрична оболонка запроектована з використанням з'єднань внапуск (див. Рисунок A.8), можна використовувати наступні положення замість положень, визначених у A.2.

(2) Наступні положення застосовуються як до з'єднань внапуск, які збільшують радіус середньої поверхні оболонки, так і до тих, які його зменшують. Якщо з'єднання внапуск проходить у кільцевому напрямку навколо осі оболонки (кільцеве з'єднання внапуск), для визначення меридіонального стиску потрібно використовувати положення A.3.2. Якщо багато з'єднань внапуск проходять у кільцевому напрямку навколо осі оболонки (кільцеві з'єднання внапуск) зі зміною товщини пластини вниз по оболонці, для визначення кільцевого стиску потрібно використовувати положення A.3.3. Якщо з'єднання внапуск проходять паралельно осі оболонки (неступінчасте меридіональне з'єднання внапуск), для визначення кільцевого стиску потрібно використовувати положення A.3.3. В інших випадках особливий підхід до визначення впливу з'єднання внапуск на опір втраті стійкості не потрібний.

A.2.4.2 *Buckling strength verification for shear*

(1) The rules of A.2.3.2 may be applied, but replacing the circumferential compression expressions by the relevant shear expressions.

A.3 **Unstiffened lap jointed cylindrical shells**

A.3.1 *General*

A.3.1.1 *Definitions*

1. **circumferential lap joint**

A lap joint that runs in the circumferential direction around the shell axis.

2. **meridional lap joint**

A lap joint that runs parallel to the shell axis (meridional direction).

A.3.1.2 *Geometry and stress resultants*

(1) If a cylindrical shell is constructed using lap joints (see Figure A.8), the following provisions may be used in place of those set out in A.2.

(2) The following provisions apply both to lap joints that increase, and to lap joints that decrease the radius of the middle surface of the shell. If the lap joint runs in a circumferential direction around the shell axis (circumferential lap joint), the provisions of A.3.2 should be used for meridional compression. If many lap joints run in a circumferential direction around the shell axis (circumferential lap joints) with changes of plate thickness down the shell, the provisions of A.3.3 should be used for circumferential compression. If a single lap joint runs parallel to the shell axis (meridional lap joint), the provisions of A.3.3 should be used for circumferential compression. In other cases, no special consideration need be given for the influence of lap joints on the buckling resistance.

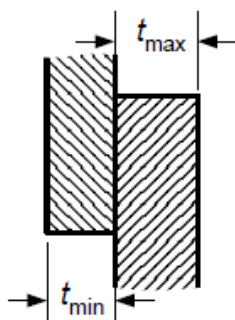


Рисунок А.8 – Оболонка, з'єднана внапуск
Figure A.8 – Lap jointed shell

А.3.2 Меридіональний (осьовий) стиск

(1) Якщо на циліндр, з'єднаний внапуск, у меридіональному напрямку діє меридіональний стиск, то опір втраті стійкості можна обчислити як для рівномірного або ступінчастого циліндра відповідно, але проектний опір потрібно зменшити множенням на 0,70.

(2) Якщо в місці стику внапуск відбувається зміна товщини пластини, значення проектного опору втраті стійкості можна брати як для більш тоншої пластини, як визначено в (1).

А.3.3 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Якщо на циліндр, з'єднаний внапуск, діє кільцевий стиск уперек меридіональних кільцевих з'єднань, проектний опір втраті стійкості можна обчислити як для рівномірного або ступінчастого циліндра відповідно, але використовуючи понижувальний коефіцієнт 0,90.

(2) Якщо на циліндр, з'єднаний внапуск у кільцевому напрямку зі зміною товщини стінки оболонки, діє кільцевий стиск, потрібно використовувати методику А.2, без геометричних обмежень за наявності ексцентриситету з'єднання, а проектний опір втраті стійкості потрібно помножити на понижувальний коефіцієнт 0,90.

(3) Якщо використовується з'єднання внапуск в обох напрямках зі ступінчастим розміщенням меридіональних з'єднань внапуск у почергових смугах або рядах, проектний опір втраті стійкості можна прийняти меншим з отриманих за (1) та (2), але без застосування понижувального

А.3.2 Meridional (axial) compression

(1) If a lap jointed cylinder is subject to meridional compression, with meridional lap joints, the buckling resistance may be evaluated as for a uniform or stepped-wall cylinder, as appropriate, but with the design resistance reduced by the factor 0,70.

(2) If a change of plate thickness occurs at the lap joint, the design buckling resistance may be taken as the same value as for that of the thinner plate as determined in (1).

А.3.3 Circumferential (hoop) compression

(1) If a lap jointed cylinder is subject to circumferential compression across meridional lap joints, the design buckling resistance may be evaluated as for a uniform or stepped-wall cylinder, as appropriate, but with a reduction factor of 0,90.

(2) If a lap jointed cylinder is subject to circumferential compression, with many circumferential lap joints and a changing plate thickness down the shell, the procedure of A.2 should be used without the geometric restrictions on joint eccentricity, and with the design buckling resistance reduced by the factor 0,90.

(3) If the lap joints are used in both directions, with staggered placement of the meridional lap joints in alternate strakes or courses, the design buckling resistance should be evaluated as the lower of those found in (1) or (2). No further resistance reduction is needed.

коефіцієнта.

A.3.4 Зсув

(1) Якщо на циліндр, з'єднаний внапуск, діє мембранний зсув, опір втраті стійкості можна обчислити як для рівномірного або для ступінчастого циліндра відповідно.

A.4 Непідсилені конічні оболонки

A.4.1 Загальні положення

A.4.1.1 Позначення

(1) У цьому розділі використовуються наступні позначення:

h осьова довжина (висота) зрізаного конуса;

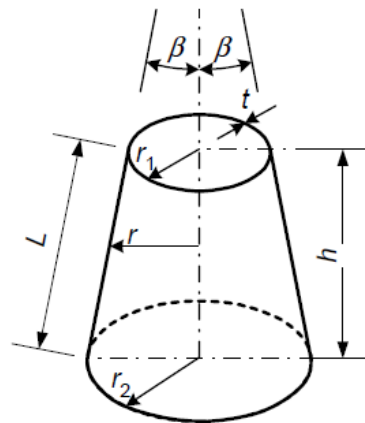
L меридіональна довжина зрізаного конуса;

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

r_1 радіус зрізаного кінця конуса;

r_2 радіус основи конуса;

β половина кута вершини конуса.



A.3.4 Shear

(1) If a lap jointed cylinder is subject to membrane shear, the buckling resistance may be evaluated as for a uniform or stepped-wall cylinder, as appropriate.

A.4 Unstiffened conical shells

A.4.1 General

A.4.1.1 Notation

(1) In this clause the following notations are used:

h is the axial length (height) of the truncated cone;

L is the meridional length of the truncated cone;

r is the radius of the cone middle surface, perpendicular to axis of rotation, that vanes linearly down the length;

r_1 is the radius at the small end of the cone;

r_2 is the radius at the large end of the cone;

β is the apex half angle of cone.

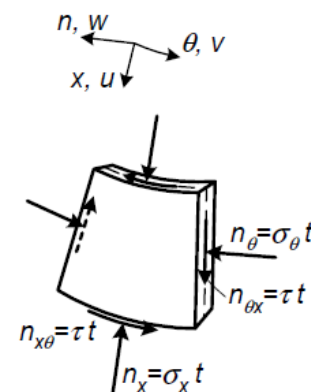


Рисунок А.9 – Геометрія конуса, мембранні та результуючі напруження
Figure A.9 – Cone geometry, membrane stresses and stress resultants

A.4.1.2 Граничні умови

(1) Наступні вирази потрібно застосовувати тільки для оболонок із граничними умовами BC1 або BC2 на обох кінцях (див. 5.2 і 6.2), без різниці між ними. Ці вирази не слід застосовувати для

A.4.1.2 Boundary conditions

(1) The following expressions should be used only for shells with boundary conditions BC 1 or BC 2 at both edges (see 5.2 and 6.2), with no distinction made between them. They should not be used for a shell in which any

оболонки, в якій є будь-яка гранична умова відноситься до типу ВС 3.

(2) Правила розділу А.4.1 потрібно застосовувати тільки для наступних двох обмежувальних граничних умов радіального зміщення будь-якого кінця конуса:

«умова циліндра» $w = 0$;

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

A.4.1.3 Геометрія

(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)

A.4.2 Розрахункові критичні напруження при втраті стійкості

A.4.2.1 Еквівалентний циліндр

(1) Всі розрахункові критичні напруження при втраті стійкості, які необхідні для перевірки міцності на втрату стійкості відповідно до 6.2.3 можна знайти шляхом розрахунку конічної оболонки як еквівалентного циліндра завдовжки l_e і з радіусом r_e , де l_e і r_e залежать від типу напруження, згідно з Таблицею А.12.

boundary condition is BC 3.

(2) The rules in this clause A.4.1 should be used only for the following two radial displacement restraint boundary conditions, at either end of the cone:

"cylinder condition" $w = 0$;

"ring condition" $u \sin \beta + w \cos \beta = 0$

A.4.1.3 Geometry

(1) Only truncated cones of uniform wall thickness and with apex half angle $\beta \leq 65^\circ$ (see Figure A.9) are covered by the following rules.

A.4.2 Design buckling stresses

A.4.2.1 Equivalent cylinder

(1) The design buckling stresses that are needed for the buckling strength verification according to 6.2.3 may be derived from an equivalent cylinder of length l_e and of radius r_e in which l_e and r_e depend on the type of stress according to Table A.12.

Таблиця А.12 – Довжини і радіуси еквівалентного циліндра

Table A.12 – Equivalent cylinder length and radius

Навантаження Loading	Еквівалентна довжина Equivalent length	Еквівалентний радіус циліндра Equivalent cylinder radius
Меридіональний стиск Meridional compression	$l_e = L$	$r_e = \frac{r}{\cos \beta}$
Кільцевий стиск (обруч) Circumferential (hoop) compression	$l_e = L$	$r_e = \frac{r_1 + r_2}{2 \cos \beta}$
Рівномірний зовнішній тиск q , для конусів які мають граничні умови ВС1, або ВС2 на обох кінцях Uniform external pressure q cones) Boundary conditions: Either BC 1 at both ends or BC 2 at both ends	l_e менше за/is the lesser of $l_{e,1} = L$ i/and $l_e = \frac{r_2(0,53 + 0,125\beta)}{\sin \beta}$ (β у радіанах, див. Рис А.9) (β in radians, see Figure A.9)	$r_e = \frac{0,55r_1 + 0,45r_2}{\cos \beta}$ якщо/if $l_e = l_{e,1}$ (короткі конуси/shorter cones)
		$r_e = 0,71r_2 \frac{1 - 0,1\beta}{\cos \beta}$ якщо/if $l_e = l_{e,2}$ (довгі конуси/longer cones)

Зсув Shear	$l_e = h$	$r_e = (1 + \rho - \frac{1}{\rho})r_1 \cos \beta$ де/in which $\rho = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{2r_1}}$
Рівномірне кручення Uniform torsion	$l_e = L$	$r_e = r_1 \cos \beta (1 - \rho^{2.5})^{0.4}$ де/in which $\rho = \frac{L \sin \beta}{r_2}$

(2) Для конусів, на які діє рівномірний зовнішній тиск q , перевірка міцності на втрату стійкості повинна виконуватись на основі мембранного напруження:

$$\sigma_{\theta,Ed} = q_{re} / t \quad (A.43)$$

A.4.3 Перевірка міцності при втраті стійкості

A.4.3.1 Меридіональний стиск

(1) Перевірку міцності на втрату стійкості потрібно проводити в точці конуса з найбільш критичною комбінацією розрахункового меридіонального напруження і розрахункового напруження втрати стійкості, відповідно до A.3.2.2.

(2) Якщо меридіональний стиск виникає від постійної осьової сили на зрізаний конус, то малий радіус r_1 і великий радіус r_2 є місцем розміщення найбільш критичних точок.

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

(4) Розрахункове напруження при втраті стійкості потрібно визначати для еквівалентного циліндра відповідно до положення A.1.2.

A.4.3.2 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Якщо кільцевий стиск виникає від рівномірного зовнішнього тиску, перевірку стійкості потрібно проводити використовуючи кільцеве мембранне напруження $\sigma_{\theta,Ed,env}$, визначене за формулою A.43 і розрахункове критичне напруження при втраті стійкості згідно з

(2) For cones under uniform external pressure q , the buckling strength verification should be based on the membrane stress:

A.4.3 Buckling strength verification

A.4.3.1 Meridional compression

(1) The buckling design check should be carried out at that point of the cone if the combination of acting design meridional stress and design buckling stress according to A.3.2.2 is most critical.

(2) In the case of meridional compression caused by a constant axial force on a truncated cone, both the small radius r_1 and the large radius r_2 should be considered as possibly the location of the most critical position.

(3) In the case of meridional compression caused by a constant global bending moment on the cone, the small radius r_1 should be taken as the most critical.

(4) The design buckling stress should be determined for the equivalent cylinder according to A.1.2.

A.4.3.2 Circumferential (hoop) compression

(1) If the circumferential compression is caused by uniform external pressure, the buckling design check should be carried out using the acting design circumferential stress $\sigma_{\theta,Ed,env}$ determined using expression (A.43) and the design buckling stress according to A.3.2.1 and A.3.2.3.

A.3.2.1 і A.3.2.3.

(2) Якщо кільцевий стиск викликаний нерівномірним зовнішнім тиском, розрахунковий розподіл напруження $\sigma_{\theta,Ed(x)}$ потрібно замінити фіктивним напруженням $\sigma_{\theta,Ed(x)}$, яке в кожній точці перевищує обчислене значення, але виникає від фіктивного рівномірного зовнішнього тиску. Перевірку стійкості потрібно проводити згідно з пунктом (1), але використовуючи $\sigma_{\theta,Ed,env}$ замість $\sigma_{\theta,Ed}$.

(3) Проектне критичне напруження при втраті стійкості потрібно визначати для еквівалентного циліндра згідно з A.1.3.

A.4.3.3 *Зсув і рівномірне кручення*

(1) У випадку, якщо зсув виникає від постійного загального кручення конуса, перевірку стійкості потрібно проводити використовуючи розрахункове мембранне дотичне напруження τ_{Ed} в точці з координатою $r = r_e \cos \beta$ і розрахункове дотичне напруження при втраті стійкості τ_{Rd} відповідно до A.3.2.1 і A.3.2.4.

(2) Якщо зсув виникає не від загального постійного кручення (а, наприклад, від загального навантаження зсуву на конус) розрахунковий розподіл напружень $\tau_{Ed(x)}$ потрібно замінити фіктивним розподілом напруження $\tau_{Ed,env(x)}$, яке в кожній точці перевищує розрахункове значення, але виникає від фіктивного загального кручення. Перевірку стійкості при втраті стійкості потрібно проводити згідно з (1), але використовуючи $\tau_{Ed,env}$ замість τ_{Ed} .

(3) Розрахункове дотичне напруження при втраті стійкості τ_{Rd} потрібно визначати для еквівалентного циліндра відповідно до A.1.4.

A.5 Підсилені циліндричні оболонки з постійною товщиною стінки

A.5.1 Загальні положення

(1) Розглядаються наступні підсилені циліндричні оболонки:

(2) If the circumferential compression is caused by actions other than uniform external pressure, the calculated stress distribution $\sigma_{\theta,Ed(x)}$ should be replaced by a stress distribution $\sigma_{\theta,Ed(x)}$ that everywhere exceeds the calculated value, but which would arise from a fictitious uniform external pressure. The buckling design check should then be carried out as in (1), but using $\sigma_{\theta,Ed,env}$ instead of $\sigma_{\theta,Ed}$.

(3) The design buckling stress should be determined for the equivalent cylinder according to A.1.3.

A.4.3.3 *Shear and uniform torsion*

(1) In the case of shear caused by a constant global torque on the cone, the buckling design check should be carried out using the acting design shear stress τ_{Ed} at the point with $r = r_e \cos \beta$ and the design buckling stress τ_{Rd} according to A.3.2.1 and A.3.2.4.

(2) If the shear is caused by actions other than a constant global torque (such as a global shear force on the cone), the calculated stress distribution $\tau_{Ed(x)}$ should be replaced by a fictitious stress distribution $\tau_{Ed,env(x)}$ that everywhere exceeds the calculated value, but which would arise from a fictitious global torque. The buckling design check should then be carried out as in (1), but using $\tau_{Ed,env}$ instead of τ_{Ed} .

(3) The design buckling stress τ_{Rd} should be determined for the equivalent cylinder according to A.1.4.

A.5 Stiffened cylindrical shells of constant wall thickness

A.5.1 General

(1) Stiffened cylindrical shells can be made of either:

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

(2) В обох випадках перевірка стійкості може бути виконана шляхом розгляду підсиленої стінки як еквівалентної ортотропної оболонки, згідно з А.5.6, за умови, що виконуються вимоги А.5.6.

(3) Для панелей без меридіональних елементів жорсткості, гофрованих в кільцевому напрямку, опір пластичній втраті стійкості визначається за правилами, наведеними у А.5.4.2(3), (4) і (5).

(4) Якщо гофрований в кільцевому напрямку настил не сприймає осьових навантажень, опір пластичній втраті стійкості можна визначати за А.5.4.3.

А.5.2 Ізотропні стінки з меридіональним підсиленням

А.5.2.1 Загальні положення

(1) Якщо ізотропна стінка має меридіональні стрингери, то в оцінці меридіональних стискуючих напружень у стінці та елементі жорсткості слід брати до уваги ефект вкорочення стінки під впливом внутрішнього тиску.

(2) Опір розриву меридіонального шва має визначатись як для ізотропної оболонки.

(3) Якщо елементи жорсткості у вузлах з'єднань сприймають кільцеві розтягуючі зусилля, вплив цих зусиль має бути врахований при оцінці сил що діють на елемент жорсткості, а також його схильності до розриву під дією кільцевого розтягу.

А.5.2.2 Меридіональний (осьовий) тиск

(1) Стінка оболонки проектується за тими ж критеріями для стиску при втраті стійкості що і у випадку з непідсиленою стінкою, окрім випадку, коли максимальна відстань між елементами жорсткості $d_{s,max}$

- isotropic walls stiffened with meridional and circumferential stiffeners;

- corrugated walls stiffened with meridional and circumferential stiffeners.

(2) In both cases, buckling checks can be made by assuming the stiffened wall to behave as an equivalent orthotropic shell according to the rules given in A.5.6, provided that conditions issued in A.5.6 are met.

(3) In case of circumferentially corrugated sheeting without meridional stiffeners the plastic buckling resistance can be calculated according to rules given in A.5.4.2(3), (4) and (5).

(4) If the circumferentially corrugated sheeting is assumed to carry no axial load, the buckling resistance of an individual stiffener can be evaluated according to A.5.4.3.

А.5.2 Isotropic walls with meridional stiffeners

А.5.2.1 General

(1) If an isotropic wall is stiffened by meridional (stringer) stiffeners, the effect of compatibility of the shortening of the wall due to internal pressure should be taken into account in assessing the meridional compressive stress in both the wall and the stiffeners.

(2) The resistance against rupture on a meridional seam should be determined as for an isotropic shell.

(3) If a structural connection detail includes the stiffener as part of the means of transmitting circumferential tensions, the effect of this tension on the stiffener should be taken into account in evaluating the force in the stiffener and its susceptibility to rupture under circumferential tension.

А.5.2.2 Meridional (axial) compression

(1) The wall should be designed for the same axial compression buckling criteria as the unstiffened wall unless the maximum meridional distance between stiffeners $d_{s,max}$ (Figure A.10) is lower than $2\sqrt{rt}$, where t is

(Рис. А.10) менша ніж $2\sqrt{rt}$, де t це місцева товщина стінки.

(2) Якщо крок меридіональних елементів жорсткості менший за $2\sqrt{rt}$, опір втрати стійкості стінки оцінюється за процедурою, наведеною у А.5.6.

(3) Оцінку міцності на осьовий стиск при втраті стійкості самих елементів жорсткості слід виконувати за положеннями EN 1999-1-1.

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

А.5.2.3 Кільцевий стиск (обруч)

(1) Стінка оболонки має пройти ті ж перевірки на дію зовнішнього тиску при втраті стійкості, що й непідсилена стінка, окрім випадків, коли проводиться більш грубий розрахунок.

(2) У випадку більш грубого розрахунку, меридіональні елементи жорсткості допускається «розгладити», щоб отримати відповідну ортотропну оболонку. Тоді оцінку напружень при втраті стійкості можна проводити згідно положень А.5.6, враховуючи жорсткість розтягу $C_\phi = C_\theta = Et$ та зсувну мембранну жорсткість $C_{\phi\theta} = 0,38Et$.

А.5.2.4 Зсув

(1) Якщо більша частина стінки оболонки піддається впливу зсуву (при ексцентричному наповненні, при землетрусі тощо), опір мембранному зсуву при втраті стійкості слід визначати як для ізотропної непідсиленої стінки (див. А.1.4), хоча можна збільшити опір, врахувавши елементи жорсткості. Як приведену довжину l , для оболонки під дією зсуву, приймають менше зі значень відстані між кільцями жорсткості, відстані між гранями або подвоєного кроку меридіональних елементів жорсткості, за умови, що кожен елемент має жорсткість на згин EI_y у меридіональному напрямку, вищу за:

the local thickness of the wall.

(2) Where meridional stiffeners are placed at closer spacing than $2\sqrt{rt}$, the buckling resistance of the complete wall should be assessed by using the procedure given in А.5.6.

(3) The axial compression buckling strength of the stiffeners themselves should be evaluated using the provisions of EN 1999-1-1.

(4) The eccentricity of the stiffener to the shell wall should be taken into account, where appropriate.

А.5.2.3 Circumferential (hoop) compression

(1) The wall should be checked for the same external pressure buckling criteria as the unstiffened wall unless a more rigorous calculation is carried out.

(2) In a more rigorous calculation the meridional stiffeners may be smeared to give an orthotropic wall, and the buckling stress assessment carried out using the provisions of А.5.6, assuming a stretching stiffness $C_\phi = C_\theta = Et$ and a shear membrane stiffness $C_{\phi\theta} = 0,38Et$.

А.5.2.4 Shear

(1) If a major part of the shell wall is subjected to shear loading (as with eccentric filling, earthquake loading etc.), the membrane shear buckling resistance should be found as for an isotropic unstiffened wall (see А.1.4), but the resistance may be increased by taking account of the stiffeners. The equivalent length l of shell in shear may be taken as the lesser of the height between stiffening rings or boundaries and twice the meridional separation of the meridional stiffeners, provided that each stiffener has a flexural rigidity EI_y for bending in the meridional direction (about a circumferential axis) greater than:

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

де:

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

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

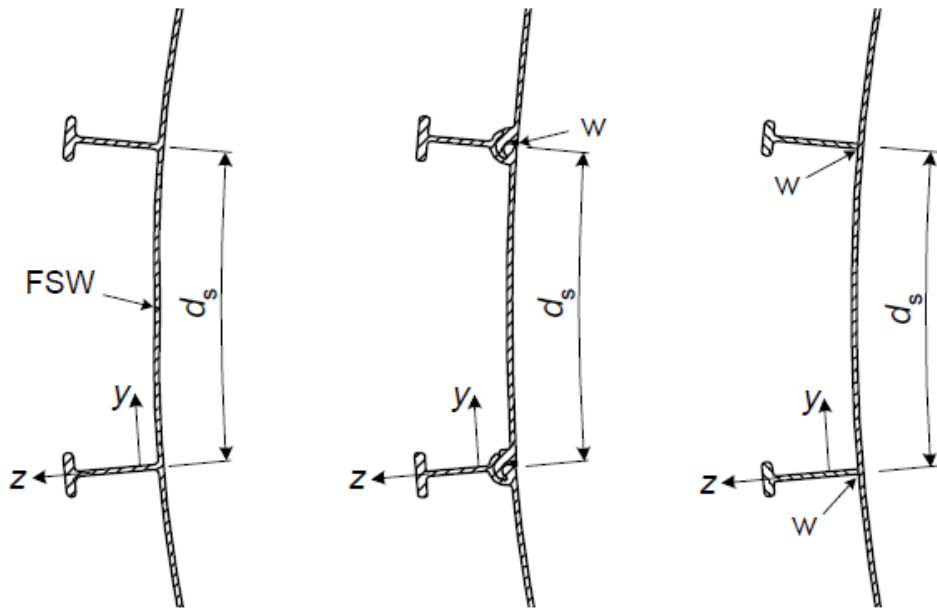
(3) За умов, описаних у (2) чи у випадку, коли елемент жорсткості передає місцеві зусилля на оболонку, прийняте значення опору передачі зсуву між елементом жорсткості та оболонкою не має перевищувати величин, наведених у А.1.4.

where:

the values of l and t are taken as the same as those used in the most critical buckling mode.

(2) If a discrete stiffener is abruptly terminated part way up the shell, the force in the stiffener should be taken to be uniformly redistributed into the shell over a length not exceeding $4\sqrt{rt}$

(3) If the stiffeners are terminated as above, or used to introduce local forces into the shell, the assessed resistance for shear transmission between the stiffener and the shell should not exceed the value given in A.1.4.



Позначення: w = зварний шов, FSW = зварювання тертям з перемішуванням
Key: w = weld, FSW = friction stir welding

Рисунок А.10 – Типові оболонки (а) та (б) з профілів, а також (с) з профілів і пластин, підсилені в осьовому напрямку

Figure A.10 – Typical axially stiffened shells made of (a) and (b) extrusions and (c) plates and extrusions

А.5.3 Ізотропні стінки з кільцевими елементами жорсткості

(1) Для перевірки на втрату стійкості керуються правилами, поданими у А.5.6, умовно розглядаючи підсилену оболонку як ортотропну.

A.5.3 Isotropic walls with circumferential stiffeners

(1) For the purpose of buckling checks, rules given in A.5.6 apply assuming the stiffened wall to behave as an orthotropic shell.

A.5.4 Кільцево гофровані стінки з меридіональними елементами жорсткості

A.5.4.1 Загальні положення

(1) В усіх розрахунках слід використовувати товщину без покриттів і геометричних допусків.

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

(3) Якщо циліндрична стінка з кільцевим гофруванням має прилеглі меридіональні елементами жорсткості, слід вважати, що така стінка не сприймає меридіональні зусилля, окрім випадку, коли вона розглядається як ортотропна оболонка, див. A.5.6.

(4) Особливу увагу слід приділяти забезпеченню того, щоб елементи мали постійну гнучкість в меридіональній площині, нормальній до стінки, так як це необхідно для розвитку опору втраті стійкості.

(5) Якщо стінка підсилюється меридіонально, то закріплення настилу до елементів жорсткості має забезпечити передачу розподілених дотичних навантажень з настилу на елементи жорсткості. Необхідно підібрати потрібну товщину настилу, щоб запобігти розриву в місцях кріплень, зважаючи на знижену несучу здатність гофрованого настилу в місцях цих з'єднань.

(6) Необхідно виконати всі розрахунки результуючих напружень, опорів та решту перевірок, наведених у 5, 6.1 та A.1, з урахуванням викладеного вище в пунктах від (1) до (5).

Примітка. Приклад влаштування підсилення стінки показано на Рисунку A.11.

(7) Болти закріплення панелей мають задовільняти умови EN 1999-1-1. Мінімальний діаметр болта M8.

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

(9) Крок між закріпленнями по периметру не повинен перевищувати 3° по

A.5.4 Circumferentially corrugated walls with meridional stiffeners

A.5.4.1 General

(1) All calculations should be carried out with thickness exclusive of coatings and geometric tolerances.

(2) The minimum core thickness for the corrugated sheeting of the wall should be 0,68mm.

(3) If the cylindrical wall is fabricated from corrugated sheeting with the corrugations running circumferentially and meridional stiffeners are attached to the wall, the corrugated wall should be assumed to carry no meridional forces unless the wall is treated as an orthotropic shell, see A.5.6.

(4) Particular attention should be paid to ensure that the stiffeners are flexurally continuous with respect to bending in the meridional plane normal to the wall, because the flexural continuity of the stiffener is essential in developing resistance to buckling.

(5) If the wall is stiffened with meridional stiffeners, the fasteners between the sheeting and stiffeners should be proportioned to ensure that the distributed shear loading on each part of the wall sheeting is transferred into the stiffeners. The sheeting thickness should be chosen to ensure that local rupture at these fasteners is prevented, taking proper account of the reduced bearing strength of fasteners in corrugated sheeting.

(6) The design stress resultants, resistances and checks should be carried out as in 5, 6.1 and A.1, but including the additional provisions set out in (1) to (5) above.

NOTE: Example of arrangement for stiffening the wall are shown in Figure A.11.

(7) Bolts for fastenings between panels should satisfy the requirements of EN 1999-1-1. The bolt size should not be less than M8.

(8) The joint detail between panels should comply with the provisions of EN 1999-1-4 for bolts loaded in shear.

(9) The spacing between fasteners around the circumference should not exceed 3° of the

окружності.

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

Примітка. Типова схема болтового з'єднання панелей показана на Рисунку А.12.

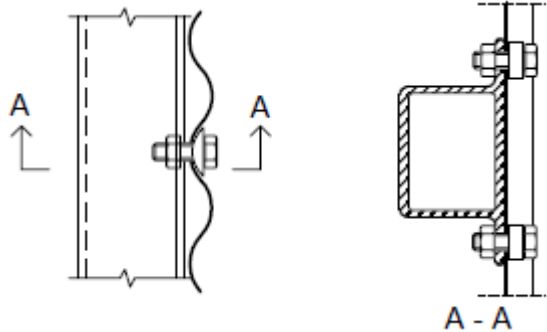


Рисунок А.11 – Приклад влаштування меридіонального підсилення оболонок з кільцевим гофруванням

Figure A.11 – Example of arrangement for meridional stiffeners on circumferentially corrugated shells

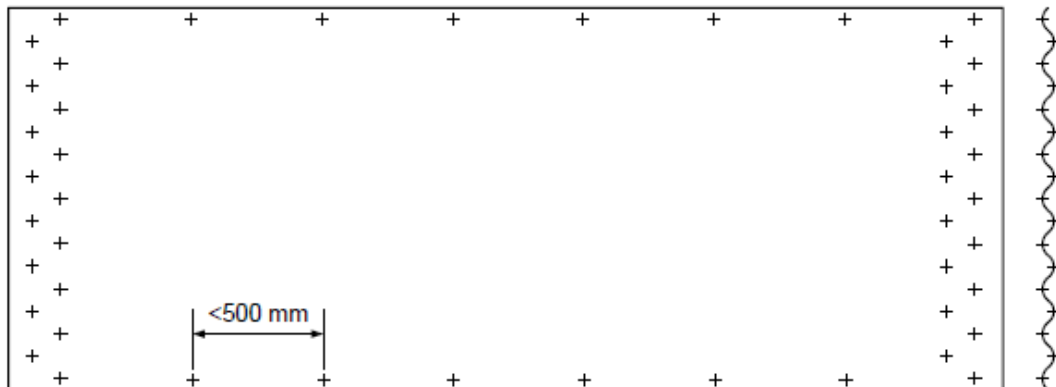


Рисунок А.12 – Типова схема болтового з'єднання панелей гофрованої оболонки

Figure A.12 – Typical bolt arrangement for panel of a corrugated shell

A.5.4.2 Осьовий стиск

(1) Розрахунковий опір осьовому стиску у кожній точці оболонки слід визначати, використовуючи зазначений клас допуску за виконанням, інтенсивність внутрішнього тиску p і рівномірно розподіленого кільцевого стискуючого напруження. При проектуванні необхідно враховувати кожну точку стінки оболонки, не звертаючи уваги на меридіональні зміни осьового стиску, за винятком випадків, передбачених цією Частиною.

circumference.

(10) If penetrations are made in the wall for hatches, doors, augers or other items, a thicker corrugated sheet should be used locally to ensure that the local stress raisers associated with mismatches of stiffness do not lead to local rupture.

NOTE: A typical bolt arrangement detail for a panel is shown in Figure A.12.

A.5.4.2 Axial compression

(1) Under axial compression, the design resistance should be determined at every point in the shell using the specified tolerance class for execution, the intensity of the guaranteed co-existent internal pressure p and the circumferential uniformity of the compressive stress. The design should consider every point on the shell wall, ignoring the meridional variation of the axial compression, except where the provisions of this Part allow for this.

(2) Розрахунок на втрату стійкості стінок з меридіональним підсиленням слід проводити за одним з двох методів:

a) розрахунок на втрату стійкості еквівалентної ортотропної оболонки (див. А.5.6) якщо меридіональна відстань між елементами жорсткості відповідає вимогам А.5.6.1(3);

b) розрахунок на втрату стійкості окремих елементів жорсткості (вважається, що гофрована стінка не сприймає осьові навантаження, але забезпечує додатковий опір елементам жорсткості) згідно з А.5.4.3 якщо меридіональна відстань між елементами жорсткості не відповідає вимогам А.5.6.1(3).

(3) Для гофрованої оболонки без меридіонального підсилення, характеристичне значення місцевого опору пластичній втраті стійкості приймається як більше зі значень:

$$n_{x,Rk} = \frac{t^2 f_0}{2d} \quad (\text{A.45})$$

або

and

$$n_{x,Rk} = \frac{r_\phi t f_0}{r} \quad (\text{A.46})$$

де:

t товщина листа

d відстань між піком вершини і низом западини;

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

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

Примітка. Місцевий опір пластичній втраті стійкості це опір зминанню гофрування.

(4) Розрахункове значення місцевого опору пластичній втраті стійкості визначається за:

(2) If the wall is stiffened with meridional stiffeners, the buckling design of the wall should be carried out using one of two alternative methods:

a) buckling of the equivalent orthotropic shell (following A.5.6) if the meridional distance between stiffeners satisfies A.5.6.1(3);

b) buckling of the individual stiffeners (corrugated wall assumed to carry no axial force, but providing restraint to the stiffeners) and following A.5.4.3 if the meridional distance between stiffeners does not satisfy A.5.6.1(3).

(3) If the corrugated shell has no meridional stiffeners, the characteristic value of local plastic buckling resistance should be determined as the greater of:

where:

t is the sheet thickness;

d is the crest to trough amplitude;

r_ϕ is the local curvature of the corrugation (see Figure A.14);

The local plastic buckling resistance $n_{x,Rk}$ should be taken as independent of the value of internal pressure p_n .

NOTE: The local plastic buckling resistance is the resistance to corrugation collapse or “roll-down”.

(4) The design value of the local plastic buckling resistance should be determined as:

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

де:

$\alpha_x = 0,80$ та γ_{M1} згідно з 2.7.2.

(5) В кожній точці конструкції розрахункові напруження мають задовільняти наступну вимогу:

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

A.5.4.3 Підсилені стінки, в яких осьовий тиск сприймається виключно елементами жорсткості

(1) Якщо вважається, що гофрована стінка не сприймає осьові навантаження (метод (b) у A.5.4.3), можна припустити, що настил має здатність стримувати переміщення в площині стінки елементів жорсткості при втраті стійкості, а отже опір втраті стійкості слід розраховувати за одним з двох методів:

(a) ігноруючи вплив настилу, як такий, що стримує переміщення втрати стійкості в площині, нормальній до стіни;

(b) враховуючи вплив настилу, як такий, що стримує переміщення втрати стійкості в площині, нормальній до стіни.

(2) У методі (a) пункту (1) опір окремого елемента жорсткості можна приймати як опір концентричному стиску елемента. Розрахункове значення опору втраті стійкості $N_{s,Rd}$ визначають за:

$$N_{s,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_0}{\gamma_{M1}} \quad (\text{A.49})$$

де:

A_{eff} ефективна площа поперечного перерізу елемента жорсткості.

(3) Понижуючий коефіцієнт χ слід приймати за EN 1999-1-1 для втрати стійкості за згинальною формою перпендикулярно до стінки (по кільцевій осі) відповідно до типу сплаву, використовуючи криву стійкості 2 незалежно від сплаву ($\alpha = 0,32$ і $\bar{\lambda}_0 = 0$).

За ефективну довжину колони у визначенні

in which:

$\alpha_x = 0,80$ and γ_{M1} as given in 2.7.2.

(5) At every point in the structure the design stresses should satisfy the condition:

A.5.4.3 Stiffened wall treated as carrying axial compression only in the stiffeners

(1) If the corrugated sheeting is assumed to carry no axial force (method (b) in A.5.4.3), the sheeting may be assumed to restrain all buckling displacements of the stiffener in the plane of the wall, and the resistance to buckling should be calculated using one of the two following two alternative methods:

(a) ignoring the supporting action of the sheeting in resisting buckling displacements normal to the wall;

(b) allowing for the stiffness of the sheeting in resisting buckling displacements normal to the wall.

(2) Using method (a) in (1), the resistance of an individual stiffener may be taken as the resistance to concentric compression on the stiffener. The design buckling resistance $N_{s,Rd}$ should be obtained from:

where:

A_{eff} is the effective cross-sectional area of the stiffener.

(3) The reduction factor χ should be obtained from EN 1999-1-1 for flexural buckling normal to the wall (about the circumferential axis) according to the type of alloy and using buckling curve 2 irrespective of the alloy adopted ($\alpha = 0,32$ and $\bar{\lambda}_0 = 0$).

The effective length of column used in

понижуючого коефіцієнта χ слід брати відстань між сусідніми кільцями жорсткості.

(4) Якщо враховується пружний опір стінки втраті стійкості елемента жорсткості, мають задовольнятися наступні умови:

а) Ділянка стінки, що забезпечує додатковий пружний опір втраті стійкості елемента жорсткості, повинна мати довжину, що дорівнює довжині стінки, так само як прилеглі елементи жорсткості (див. Рисунок А.13), а також мати вільне обпирання на обох кінцях.

б) Не потрібно брати до уваги жорсткість сипучих або інших матеріалів, що можуть міститись в оболонці.

(5) Пружне критичне навантаження втраті стійкості $N_{s,cr}$ розраховується як для рівномірно розподіленого стиску, що діє на поперечний переріз (якщо не вимагається більш точний розрахунок), за формулою:

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

де:

EI_s згинна жорсткість елемента жорсткості на вигин з площини стінки (Нмм²);

K згинна жорсткість настилу (Н/мм на мм висоти стінки) в прольоті між меридіональними елементами жорсткості, як це показано на Рисунку А.13;

(6) Згинна жорсткість пластини стінки k визначається з припущенням, що стінка в прольоті між двома прилеглими меридіональними елементами жорсткості є вільно обпертою по обох кінцях (див. Рисунок А.13). Значення k визначають за:

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

де:

D_θ згинна жорсткість настилу при кільцевому згині;

determining the reduction factor χ should be taken as the distance between adjacent ring stiffeners.

(4) If the elastic restraint provided by the wall against buckling of the stiffener is taken into account, both of the following conditions should be met:

a) The section of wall deemed to provide restraint should be the length of wall as far as the adjacent stiffeners (see Figure A.13), with simply supported conditions at the two ends.

b) No account should be taken of the possible stiffness of stored bulk solid.

(5) Unless more precise calculations are made, the elastic critical buckling load $N_{s,cr}$ should be calculated assuming uniform compression on the cross-section at any level, using:

where:

EI_s is the flexural rigidity of the stiffener for bending out of the plane of the wall (Nmm²);

K the flexural stiffness of the sheeting (N/mm per mm of wall height) spanning between meridional stiffeners, as indicated in Figure A.13;

(6) The flexural stiffness of the wall plate k should be determined assuming that the sheeting spans between adjacent meridional stiffeners on either side with simply supported boundary conditions, see Figure A.13. The value of k may be found using:

where:

D_θ is the flexural rigidity of the sheeting for circumferential bending;

d_s крок меридіональних елементів жорсткості.

(7) Якщо гофрування має арково-тангенційну або синусоїдну форму, значення D_θ можна прийняти за А.5.7(6). Якщо використовується інша форма, згинну жорсткість необхідно визначати конкретно для даної форми поперечного перерізу.

(8) Проектні напруження в кожній точці елемента жорсткості мають задовільняти умову:

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

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

A.5.4.4 Кільцевий тиск (обруч)

(1) Правила, наведені у А.5.6.3 є справедливими для перевірки на втрату стійкості, якщо розглядати підсилену стінку як ортотропну оболонку.

d_s is the separation of the meridional stiffeners.

(7) If the corrugation is an arc-and-tangent or sinusoidal profile, the value of D_θ may be taken from A.5.7(6). If other corrugation sections are adopted, the flexural rigidity for circumferential bending should be determined for the actual cross section.

(8) At every point in the stiffener, the design stresses should satisfy the condition:

(9) The resistance of the stiffeners to local and flexural torsional buckling should be determined using EN 1999-1-1.

A.5.4.4 Circumferential (hoop) compression

(1) For the purpose of buckling checks, rules given in A.5.6.3 apply assuming the stiffened wall to behave as an orthotropic shell.

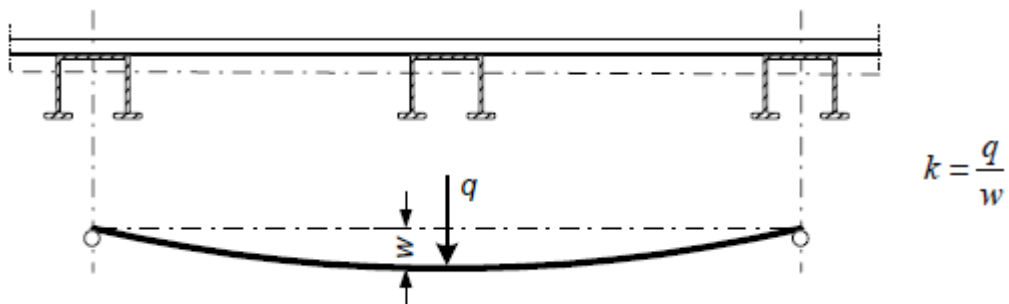


Рисунок А.13 – Опір пластинчастих елементів жорсткості для оцінки втрати стійкості колон
Figure A.13 – Plate restraint stiffness for evaluation of column buckling

A.5.5 Стінки з осьовим гофруванням і кільцями жорсткості

A.5.5.1 Загальні положення

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

- а) слід припустити, що гофрована стінка не сприймає осьові навантаження;
- б) слід припустити, що гофрована стінка є розтягнутою між прилеглими кільцями і довжина прольоту дорівнює

A.5.5 Axially corrugated walls with ring stiffeners

A.5.5.1 General

(1) If the cylindrical wall is fabricated using corrugated sheeting with the corrugations running axially, both of the following conditions should be met:

- а) the corrugated wall should be assumed to carry no meridional forces;
- б) the corrugated sheeting should be assumed to span between attached rings, using the centre to centre separation between rings,

відстані між центрами цих кілець. Також припускається, що настил є неперервним.

(2) Стики між секціями настилу мають забезпечити досягнення припущення щодо його неперервності.

(3) При оцінці осьових стискуючих зусиль, що виникають внаслідок тертя сипучих матеріалів вмісту оболонки по її стінці слід враховувати весь периметр оболонки, а також форму гофрування.

(4) Якщо гофрований настил доходить до опорної границі бази, то слід врахувати місцеву гнучкість краю настилу, а границю умову розглядати як радіально закріплену.

(5) Необхідно прийняти припущення, що гофрована стінка не сприймає кільцевих зусиль.

(6) Крок кілець жорсткості має визначатись як за розрахунком гофрованої балки на згин, припускаючи неперервність стінки на кільцях та враховуючи різні радіальні переміщення для кілець різних розмірів. Напруження, спричинені таким згином, потрібно додавати до напружень від осьового стиску при перевірці на опір втраті стійкості під дією осьового стиску.

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

(7) Кільця жорсткості, що призначені сприймати меридіональні навантаження, мають підбиратись за EN 1999-1-1.

A.5.5.2 *Осьовий стиск*

(1) Правила, наведені у A.5.6.2 є справедливими для перевірки на втрату стійкості, якщо розглядати підсилену стінку як ортотропну оболонку.

A.5.5.3 *Кільцевий стиск (обруч)*

(1) Правила, наведені у A.5.6.3 є справедливими для перевірки на втрату стійкості, якщо розглядати підсилену стінку як ортотропну оболонку.

and adopting the assumption of sheeting continuity.

(2) The joints between sheeting sections should be designed to ensure that assumed flexural continuity is achieved.

(3) The evaluation of the axial compression force in the wall arising from wall frictional tractions from the bulk solid should take account of the full circumference of the shell, allowing for the profile shape of the corrugation.

(4) If the corrugated sheeting extends to a base boundary condition, the local flexure of the sheeting near the boundary should be considered, assuming a radially restrained boundary.

(5) The corrugated wall should be assumed to carry no circumferential forces.

(6) The spacing of ring stiffeners should be determined using a beam bending analysis of the corrugated profile, assuming that the wall is continuous over the rings and including the consequences of different radial displacements of ring stiffeners that have different sizes. The stresses arising from this bending should be added to those arising from axial compression when checking the buckling resistance under axial compression.

NOTE: The meridional bending of the sheeting can be analysed by treating it as a continuous beam passing over flexible supports at the ring locations. The stiffness of each support is then determined from the ring stiffness to radial loading.

(7) The ring stiffeners designed to carry the meridional load should be proportioned in accordance with EN 1999-1-1.

A.5.5.2 *Axial compression*

(1) For the purpose of buckling checks, rules given in A.5.6.2 apply assuming the stiffened wall to behave as an orthotropic shell.

A.5.5.3 *Circumferential (hoop) compression*

(1) For the purpose of buckling checks, rules given in A.5.6.3 apply assuming the stiffened wall to behave as an orthotropic shell.

A.5.6 Підсилена стінка, що розглядається як ортотропна оболонка

A.5.6.1 Загальні положення

(1) Якщо підсилена стінка (ізотропна чи гофрована) розглядається як ортотропна оболонка, результуючі приведені жорсткостей мають прийматись як рівномірно розподілені. Жорсткості стінки гофрованої оболонки в різних напрямках визначаються за A.5.7.

(2) Властивості згину та розтягу кілець та поздовжніх ребер жорсткості, а також зовнішній ексцентриситет між їх центральними осями і серединною поверхнею стінки оболонки, визначаються разом з кроком елементів жорсткості d_s .

(3) Крок елементів жорсткості в меридіональному напрямку d_s (Рисунок A.10) не повинен перевищувати значення $d_{s,max}$ що визначаються за виразом:

$$d_{s,max} = 7.4 \left(\frac{r^2 D_y}{C_y} \right) \quad (A.53)$$

де:

D_y згинна жорсткість на одиницю ширини в кільцевому напрямку (паралельно до гофр, якщо йдеться про кільцево гофрований настил);

C_y жорсткість на розтяг на одиницю ширини в кільцевому напрямку (паралельно до гофр, якщо йдеться про кільцево гофрований настил).

A.5.6.2 Осьовий тиск

(1) Результуюче критичне напруження втрати стійкості $n_{x,cr}$ на одиницю окружності ортотропної оболонки слід визначати в кожному рівні шляхом мінімізації наступного виразу по відношенню до критичної кількості хвиль вигину у кільцевому напрямку, j і висоти вигину l_i :

A.5.6 Stiffened wall treated as an orthotropic shell

A.5.6.1 General

(1) If the stiffened wall, either isotropic or corrugated, is treated as an orthotropic shell, the resulting smeared stiffnesses should be taken to be uniformly distributed. In case of corrugated walls, the stiffnesses of the sheeting in different directions should be taken from A.5.7.

(2) The bending and stretching properties of the ring and stringer stiffeners, and the outward eccentricity of the centroid of each from the middle surface of the shell wall should be determined, together with the separation between the stiffeners d_s .

(3) The meridional distance between stiffeners d_s (Figure A.10) should not be more than $d_{s,max}$ given by:

where:

D_y is the flexural rigidity per unit width in the circumferential direction (parallel to the corrugations if circumferentially corrugated sheeting);

C_y is the stretching stiffness per unit width in the circumferential direction (parallel to the corrugations if circumferentially corrugated sheeting).

A.5.6.2 Axial compression

(1) The critical buckling stress resultant $n_{x,cr}$ per unit circumference of the orthotropic shell should be evaluated at each appropriate level in the shell by minimising the following expression with respect to the critical circumferential wave number j and the buckling height l_i :

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

де:

with:

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

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

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

де:

with:

$$C_{11} = C_\phi + EA_s / d_s$$

$$C_{12} = \nu \sqrt{C_\phi C_\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (rd_s)$$

$$C_{44} = \frac{1}{r^2} (D_\phi + EI_s / d_s)$$

$$C_{45} = \frac{\nu}{r^2} \sqrt{D_\phi D_\theta}$$

$$\omega = \frac{\pi r}{jl_i}$$

$$C_{22} = C_\theta + EA_r / d_r$$

$$C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{25} = e_r EA_r / (rd_r)$$

$$C_{55} = \frac{1}{r^2} (D_\theta + EI_r / d_r)$$

$$C_{66} = \frac{1}{r^2} \left[D_{\phi\theta} + 0,5(GI_{ts} / d_s + GI_{tr} / d_r) \right]$$

де:

l_i половина довжини хвилі ймовірного вигину в меридіональному напрямку;

j кількість хвиль вигину у кільцевому напрямку;

A_s площа поперечного перерізу поздовжнього ребра жорсткості;

I_s момент інерції поздовжнього ребра жорсткості відносно кільцевої осі серединної поверхні оболонки (при

where:

l_i is the half wavelength of the potential buckle in the meridional direction;

j number of buckling waves in the circumferential direction;

A_s the cross-sectional area of a stringer stiffener;

I_s is the second moment of area of a stringer stiffener about the circumferential axis in the shell middle surface (meridional

меридіональному згині);

d_s крок поздовжніх ребер жорсткості;

I_{ts} постійна кручення поздовжнього ребра жорсткості;

e_s зовнішній ексцентриситет поздовжнього ребра жорсткості до серединної поверхні стінки оболонки

A_r площа поперечного перерізу кільця жорсткості;

I_r момент інерції кільцевого ребра жорсткості відносно меридіональної осі серединної поверхні оболонки (при кільцевому згині);

d_r крок кільцевих ребер жорсткості;

I_{tr} постійна кручення кільцевого ребра жорсткості;

e_r зовнішній ексцентриситет кільцевого ребра жорсткості до серединної поверхні стінки 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 при згині в осьовому напрямку;

D_θ жорсткість при згині в кільцевому напрямку;

$D_{\phi\theta}$ жорсткість при згині під час кручення;

r радіус оболонки.

Примітка 1. Для випадку гофрованих стінок, вищезазначені властивості елементів жорсткості (A_s , I_s , I_{ts} тощо) стосуються лише перерізів самих елементів жорсткості, тобто в цих перерізах не дозволяється враховувати прилеглі частини стінки оболонки.

bending);

d_s is the separation between stringer stiffeners;

I_{ts} is the uniform torsion constant of a stringer stiffener;

e_s is the outward eccentricity from the shell middle surface of a stringer stiffener;

A_r the cross-sectional area of a ring stiffener;

I_r is the second moment of area of a ring stiffener about the meridional axis in the shell middle surface (circumferential bending);

d_r is the separation between ring stiffeners;

I_{tr} is the uniform torsion constant of a ring stiffener;

e_r is the outward eccentricity from the shell middle surface of a ring stiffener;

C_ϕ is the stretching stiffness in the axial direction;

C_θ is the stretching stiffness in the circumferential direction;

$C_{\phi\theta}$ is the stretching stiffness in membrane shear;

D_ϕ is the flexural rigidity in the axial direction;

D_θ is the flexural rigidity in the circumferential direction;

$D_{\phi\theta}$ is the twisting flexural rigidity in twisting;

r the radius of the shell.

NOTE 1: In case of corrugated sheeting, the above properties for the stiffeners (A_s , I_s , I_{ts} etc.) relate to the stiffener section alone: no allowance can be made for an "effective" section including parts of the shell wall.

Примітка 2. Жорсткості при розтягу і згині для гофрованого настилу див. А.5.7(5) і (6).

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

(2) Розрахунковий опір втраті загальної стійкості $n_{x,Rd}$ слід визначати аналогічно до А.1.2 та 6.2.3.2, зважаючи на клас якості оболонки. Значення критичного опору втраті загальної стійкості $n_{x,cr}$ визначаються за викладеним вище пунктом (1). Коефіцієнт підвищеної якості $Q_{stiff} = 1,3Q$ може бути застосований до оболонок з ізотропними стінками.

A.5.6.3 Кільцевий тиск (обруч)

(1) Критичне напруження втрати загальної стійкості для рівномірного зовнішнього тиску $p_{n,cr}$ потрібно оцінювати шляхом мінімізації наступного виразу по відношенню до критичної кількості хвиль вигину у кільцевому напрямку, j :

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

де:

A_1 , A_2 та A_3 аналогічно до А.5.1.2 (3).

(2) Якщо переріз стінки чи елемента жорсткості змінюється по висоті стінки, потрібно визначити декілька довжин хвилі ймовірного вигину l_i щоб обрати з них критичну, користуючись припущенням, що верхня межа вигину знаходиться на вершині зони з найтоншою стінкою.

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

(3) В якості товщини для наведених вище розрахунків потрібно приймати меншу наявну товщину листа, крім випадків, що вимагають більш точного розрахунку.

(4) Якщо оболонка не має даху і може

NOTE 2: For both stretching and bending stiffness of corrugated sheeting, see A.5.7(5) and (6).

NOTE 3: The lower boundary of the buckle can be taken at the point at which either the sheeting thickness changes or the stiffener cross-section changes: the buckling resistance at each such change needs to be checked independently.

(2) The design buckling resistance $n_{x,Rd}$ for the orthotropic shell should be determined as stated in A.1.2 and 6.2.3.2, according to the shell quality class. The critical buckling resistance $n_{x,cr}$ should be obtained from (1) above. An increased quality factor $Q_{stiff} = 1,3Q$ may be assumed for stiffened shells made of isotropic walls.

A.5.6.3 Circumferential (hoop) compression

(1) The critical buckling stress for uniform external pressure $p_{n,cr}$ should be evaluated by minimising the following expression with respect to the critical circumferential wave number, j :

where:

A_1 , A_2 and A_3 as given in A.5.1.2 (3).

(2) If the stiffeners or sheeting change with height up the wall, several potential buckling lengths l_i should be examined to determine which the most critical is, assuming always that the upper end of a buckle is at the top of the zone of thinnest sheeting.

NOTE: If a zone of thicker sheeting is used above the zone that includes the thinnest sheeting, the upper end of the potential buckle could occur either at the top of the thinnest zone, or at the top of the wall.

(3) Unless more precise calculations are made, the thickness assumed in the above calculation should be taken as the thickness of the thinnest sheeting throughout.

(4) If the shell has no roof and is

потенційно підлягати впливу вітрового тиску, отримане вище значення тиску слід помножити на 0,6.

(5) Розрахункове напруження втрати загальної стійкості для стінки слід визначати за положеннями 6.2.3.2 та А.1.3 відповідно до класу якості оболонки. Критичний тиск втрати загальної стійкості $p_{n,cr}$ визначається за викладеним вище пунктом (1). Коефіцієнт C_θ з А.1.3.1 приймається $C_\theta = 1,0$.

A.5.6.4 Зсув

(1) Для цього випадку можна застосувати правила для ізотропних стінок з меридіональними елементами жорсткості, викладені у А.5.2.4.

A.5.7 Еквівалентні ортотропні властивості гофрованого настилу

(1) Якщо гофрований настил є частиною конструкції оболонки, розрахунок можна проводити, розглядаючи настил як еквівалентну рівномірну ортотропну стінку.

(2) Наведені нижче властивості можуть застосовуватись при розрахунку напруженого стану, розрахунку на втрату стійкості конструкції, якщо гофрований настил має арково-тангенціальну або синусоїдну форму. Якщо використовується інша форма, відповідні властивості необхідно визначати конкретно для даного поперечного перерізу (див. EN 1999-1-4).

(3) Властивості гофрованого настилу повинні бути приведені до системи координат x - y , в якій вісь y спрямована паралельно гофрам (прямі лінії на поверхні), тоді як x перпендикулярно до них (западни і вершини). Гофрування має характеризуватись наступними параметрами, незалежно від фактичного профілю гофр (див. Рисунок А.14):

d відстань між піком вершини і низом западини;

l довжина гофрової хвилі;

r_ϕ місцевий радіус западини чи

potentially subject to wind buckling, the above calculated pressure should be reduced by a factor 0,6.

(5) The design buckling stress for the wall should be determined as stated in 6.2.3.2 and A.1.3 according to the shell quality class. The critical buckling pressure $p_{n,cr}$ should be obtained from (1) above. Coefficient C_θ given in A.1.3.1 should be taken as $C_\theta = 1,0$.

A.5.6.4 Shear

(1) Rules given in A.5.2.4 for isotropic walls with meridional stiffeners apply.

A.5.7 Equivalent orthotropic properties of corrugated sheeting

(1) If corrugated sheeting is used as part of the shell structure, the analysis may be carried out treating the sheeting as an equivalent uniform orthotropic wall.

(2) The following properties may be used in a stress analysis and in a buckling analysis of the structure, provided that the corrugation profile has either an arc-and-tangent or a sinusoidal shape. If other corrugation profiles are used, the corresponding properties should be calculated for actual cross section, see EN 1999-1-4.

(3) The properties of the corrugated sheeting should be defined in terms of an x - y coordinate system in which the y axis runs parallel to the corrugations (straight lines on the surface) whilst x runs normal to the corrugations (troughs and peaks). The corrugation should be defined in terms of the following parameters, irrespective of the actual corrugation profile, see Figure A.14, where:

d is the crest to crest dimension;

l is the wavelength of the corrugation;

r_ϕ is the local radius at the crest or trough.

вершини.

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

(4) All properties may be treated as one-dimensional, giving no Poisson effects between different directions.

(5) Еквівалентні мембранні властивості (жорсткість на розтяг) визначаються за:

(5) The equivalent membrane properties (stretching stiffnesses) may be taken as:

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

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

$$C_{xy} = Et_{xy} = \frac{G2t}{1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2}} \quad (\text{A.61})$$

де:

where:

t_x еквівалентна товщина для випадку приведених мембранних сил, перпендикулярних гофрам;

t_x is the equivalent thickness for smeared membrane forces normal to the corrugations;

t_y еквівалентна товщина для випадку приведених мембранних сил, паралельних гофрам;

t_y is the equivalent thickness for smeared membrane forces parallel to the corrugations;

t_{xy} еквівалентна товщина для випадку приведених мембранних сил зсуву.

t_{xy} is the equivalent thickness for smeared membrane shear forces.

(6) Еквівалентні згинальні властивості (жорсткість на вигин) визначені, виходячи з умов згинальної жорсткості під дією моментів, що спричиняють згин у відповідному напрямку (не навколо осі), і можуть бути визначені, як:

(6) The equivalent bending properties (flexural stiffnesses) are defined in terms of the flexural rigidity for moments causing bending in that direction (not about an axis), and may be taken as:

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

$$D_y = EI_y = 0,13Etd^2 \quad (\text{A.63})^2$$

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

де:

where:

I_x еквівалентний момент інерції для приведенного згину перпендикулярно гофруванню;

I_x is the equivalent second moment of area for smeared bending normal to the corrugations;

I_y еквівалентний момент інерції для

I_y is the equivalent second moment of

приведеного згину паралельно гофруванню;

I_{xy} еквівалентний момент інерції для кручення

Примітка 1. Згин паралельно гофруванню підвищує згинну жорсткість гофрованого профілю і є головною перевагою застосування гофрованих конструкцій.

Примітка 2. Альтернативні вирази щодо еквівалентних ортотропних властивостей гофрованого настилу містяться у посиланнях, що наведені в EN 1993-4-1.

(7) У кільцевих оболонках з кільцевим гофруванням напрямки осей x та y в наведених вище виразах слід замінити на осьову координату ϕ та кільцеву θ відповідно. При меридіональному гофруванні напрямки осей x та y в наведених вище виразах слід замінити на кільцеву координату θ та осьову ϕ відповідно (див. Рисунок А.14).

(8) Зсувні властивості слід приймати незалежно від орієнтації гофрування. Значення G можна прийняти рівним $E/2,6$.

area for smeared bending parallel to the corrugations;

I_{xy} is the equivalent second moment of area for twisting.

NOTE 1: Bending parallel to the corrugation engages the bending stiffness of the corrugated profile and is the chief reason for using corrugated construction.

NOTE 2: Alternative expressions for the equivalent orthotropic properties of corrugated sheeting are available in the references given in EN 1993-4-1.

(7) In circular shells, where the corrugations run circumferentially, the directions x and y in the above expressions should be taken as the axial ϕ and circumferential θ directions respectively. When the corrugations run meridionally, the directions x and y in the above expressions should be taken as the circumferential θ and axial ϕ directions respectively, see Figure A.14.

(8) The shearing properties should be taken as independent of the corrugation orientation. The value of G may be taken as $E/2,6$.

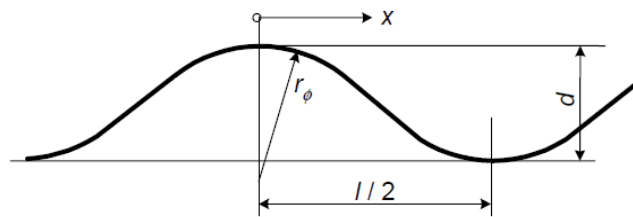


Рисунок А.14 – Профіль і геометричні характеристики гофрування
Figure A.14 – Corrugation profile and geometric parameters

А.6 Непідсилені сферичні оболонки під дією рівномірно розподіленого кільцевого стиску

A.6 Unstiffened spherical shells under uniform circumferential compression

А.6.1 Позначення та граничні умови

A.6.1 Notations and boundary conditions

(1) Геометричні величини (Рис. А.15):

(1) General quantities (Figure A.15):

r радіус серединної поверхні сфери;

r radius of sphere middle surface;

t товщина оболонки

t thickness of shell:

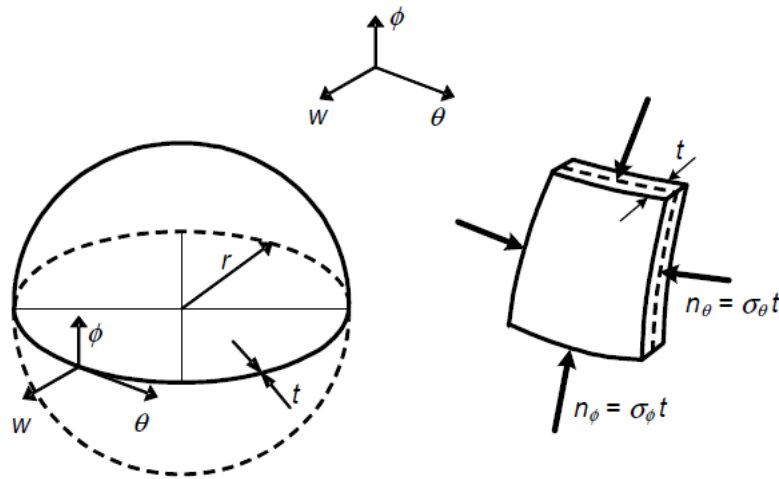


Рисунок А.15 – Геометрія сфери, мембранні та результуючі напруження
Figure A.15 – Sphere geometry and membrane stresses and stress resultants

(2) Відповідні граничні умови приводяться в пунктах 5.2 та 6.2.2.

(2) The boundary conditions are set out in 5.2 and 6.2.2.

А.6.2 Критичні напруження при втраті стійкості

A.6.2 Critical buckling stresses

(1) Наступні формули справедливі тільки для замкнутих сфер або сферичних куполів із граничними умовами BC1r чи BC1f на опорній грані.

(1) The following expressions may only be used for complete spheres or spherical caps with boundary conditions BC1r or BC1f at the base edge.

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

(2) Uniform circumferential compression in spheres or spherical caps is induced by uniform external pressure or may result from blowing action on circular silos or tank roof occurring during download.

(3) У випадку кільцевого стиску, викликаного рівномірним зовнішнім тиском p відповідні напруження визначаються наступним чином:

(3) In case of circumferential compression due to uniform external pressure p the corresponding stress can be evaluated from:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi} = \frac{pr}{2t} \tag{A.65}$$

(4) Критичне напруження при втраті стійкості спричинене рівномірно розподіленим кільцевим стиском визначається як:

(4) The critical buckling stress under uniform circumferential compression should be obtained from:

$$\sigma_{\theta,cr} = \sigma_{\phi,cr} = 0,605E \frac{t}{r} \tag{A.66}$$

А.6.3 Кільцеві коефіцієнти втрати стійкості

A.6.3 Circumferential buckling parameter

(1) Коефіцієнт недосконаlostі визначається за:

(1) The imperfection factor should be obtained from:

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6E}{f_0}} (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) \right)^{1,44}} \text{ but } \alpha_{\theta} \leq 1,00 \quad (\text{A.67})$$

де:

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ коефіцієнт гнучкості стиснутого елемента;

Q параметр допуску

(2) Параметр допуску Q береться з Таблиці А.13 для відповідного класу допуску.

(3) Коефіцієнт сплаву та коефіцієнт гнучкості стиснутого елемента слід брати з Таблиці А.14 в залежності від класу гнучкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

where:

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ is the squash limit slenderness parameter;

Q is the tolerance parameter.

(2) The tolerance parameter Q should be taken from Table A.13 for the specified tolerance class.

(3) The alloy factor and the squash limit slenderness parameter should be taken from Table A.14 according to the material buckling class as defined in EN 1999-1-1.

Таблиця А.13 – Параметр допуску Q

Table A.13 – Tolerance parameter Q

Клас допуску Tolerance class	Q
Клас 1/Class 1	16
Клас 2/Class 2	25
Класи 3 та 4/Class 3 and 4	40

Таблиця А.14 – Значення $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ та μ_{θ} для рівномірно розподіленого кільцевого стиску

Table A.14 – Values of $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ and μ_{θ} for uniform circumferential compression

Клас втрати стійкості матеріалу Material buckling class	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

ДОДАТОК В
(довідковий)
**ВИРАЗИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НА
СТІЙКІСТЬ ТОРОКОНІЧНИХ І
ТОРОСФЕРИЧНИХ ОБОЛОНОК**

ANNEX B
[informative]
**EXPRESSIONS FOR BUCKLING
ANALYSIS OF TORICONICAL AND
TORISPHERICAL SHELLS**

В.1 Загальні положення

(1) Правила даного розділу є дійсними для конічних та сферичних кінців циліндричних оболонок або еквівалентних конструкцій, з'єднаних за допомогою торичного сегмента чи на пряму до циліндру ($r_T = 0$).

В.2 Позначення та граничні умови

(1) В цьому розділі використовуються наступні позначення (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'єднуваного циліндра;

t_C товщина стінки з'єднуваного циліндра.

(2) Правила є дійсними для постійного зовнішнього тиску, що діє ортогонально на поверхню оболонки.

(3) Галузь застосування правил має наступні межі:

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

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

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

$$0 \leq r_T/r \leq 0,4 \quad (B.3)$$

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

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

В.1 General

(1) The rules in this section are valid for conical and spherical ends of cylindrical shells or equivalent structures connected by means of a torus or directly to the cylinder ($r_T = 0$).

В.2 Notations and boundary conditions

(1) In this clause the following notations are used, see Figure B.1:

r radius of middle surface of the cylindrical shell;

r_s radius of spherical shell;

α angle of the torus shell or half apex angle of the conical shell;

r_T radius of torus;

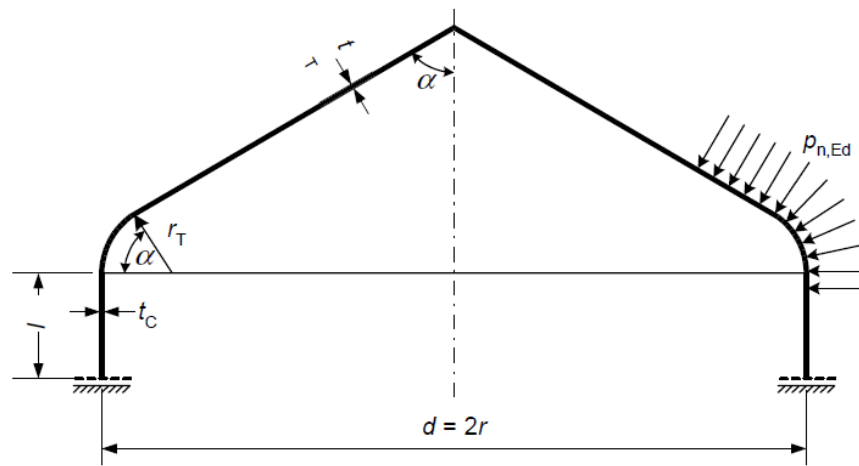
t_T thickness of torus, cone or spherical shell;

l length of connecting cylinder;

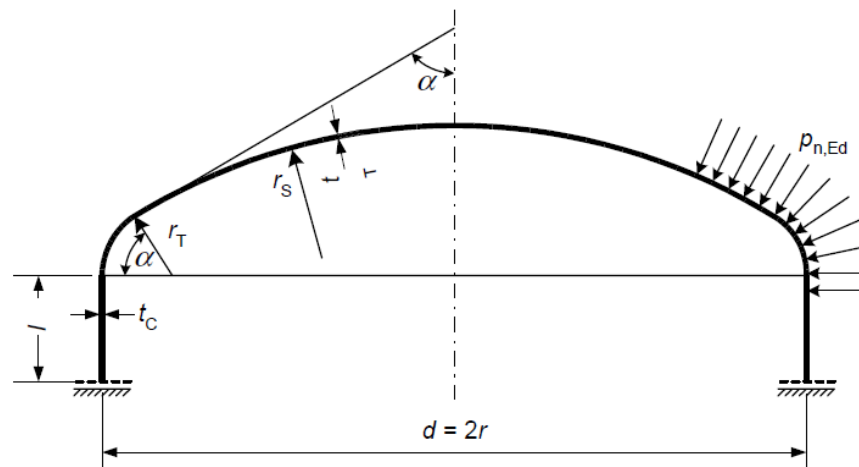
t_C wall thickness of connecting cylinder.

(2) The rules are valid for constant external pressure acting orthogonal on the shell surface.

(3) The range of applicability is the following:



а) тороконічна форма
a) toriconical shape



б) торосферична форма
b) torispherical shape

Рисунок В.1 – Геометрія і навантаження на кінцях резервуара
Figure В.1 – Geometry and loads on vessel ends

В.3 Зовнішній тиск

В.3 External pressure

В.3.1 Критичне значення зовнішнього тиску

В.3.1 Critical external pressure

(1) Критичне значення зовнішнього тиску (з умов втрати стійкості) для тороконічної оболонки:

(1) The critical (buckling) external pressure for a toriconical shell is:

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

або

or

$$p_{n,cr} = 2.60E \sin \alpha (\cos \alpha)^{1,15} (t_T / r)^{2,5}$$

для

for

$$\nu = 0,3$$

де:

where:

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

але

but

$$\bar{r} \leq r$$

(2) Критичне значення зовнішнього тиску з умов втрати стійкості для торосферичної оболонки:

(2) The critical buckling external pressure for a torispherical shell is:

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

де:

with:

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

де β береться як більше зі значень

where β is the larger of

$$\beta = 0,105 \left(\frac{t_C}{r}\right)^{0,19}$$

та

and

$$\beta = 0,088 \left(\frac{r_T}{r}\right)$$

В.3.2 Граничний зовнішній тиск з умов рівномірно розподіленого зминання

(1) Граничний зовнішній тиск з умов рівномірно розподіленого зминання визначається за виразом (В.9) або за графіком на Рисунку В.2, чи може бути наближено прийнятий за формулами (В.10) або (В.11) при $r_T = 0$.

В.3.2 Uniform squash limit external pressure

(1) The uniform squash limit external pressure for toriconical and torispherical shells is given by expression (B.9) or may be found in the graph in Figure B.2 or may, for $r_T = 0$, be approximated by formula (B.10) or (B.11)

$$p_{n,Rk} = f_0 \left(14,5 - 450 \frac{f_0}{E}\right) \left(1 + 2 \frac{r_T}{r} + 7,13 \left(\frac{r_T}{r}\right)^2\right) \frac{\cos \alpha}{\left(\frac{2r}{t}\right)^{1,15}} \quad (\text{B.9})$$

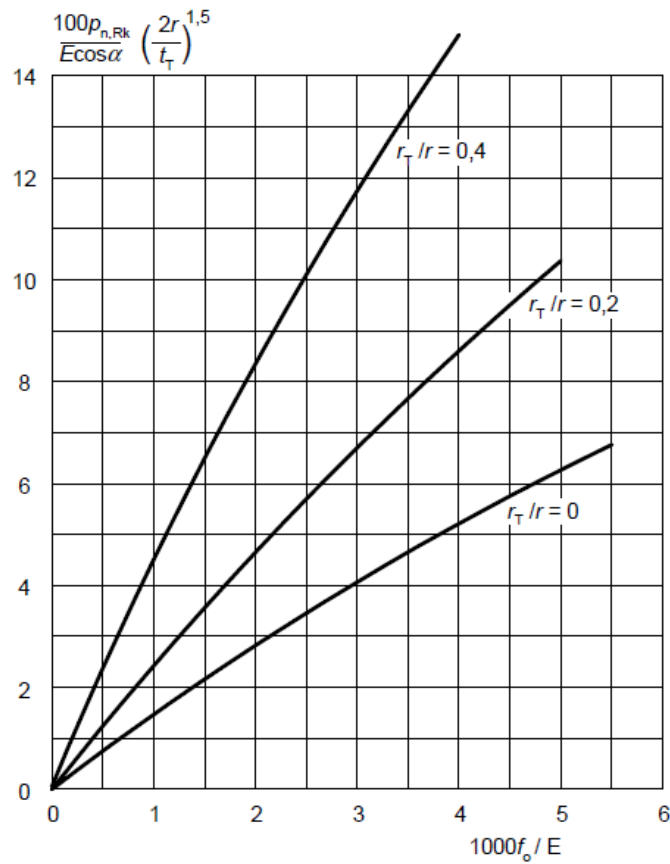


Рисунок В.2 – Пластичний зовнішній тиск для тороконічних та торосферичних оболонок
Figure В.2 – Plastic external pressure for toriconical and torispherical shells

- для тороконічної оболонки

- for a toriconical shell

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

- для торосферичної оболонки

- for a torispherical shell

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

В.3.3 Коефіцієнт втрати стійкості під дією зовнішнього тиску

B.3.3 External pressure buckling parameter

(1) Коефіцієнт недосконалості слід визначати за:

(1) The imperfection factor should be obtained from:

$$\alpha_\theta = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6E}{f_0}} (\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_{\theta,0}) \right)^{1,44}} \quad (B.12)$$

але

but

$$\alpha_\theta \leq 1,00$$

де:

where:

$\lambda_{\theta,0}$ коефіцієнт гнучкості стиснутого

$\lambda_{\theta,0}$ is the squash limit slenderness

елемента;

Q параметр допуску.

(2) Параметр допуску Q береться з Таблиці В.1 для відповідного класу допуску.

(3) Коефіцієнт сплаву та коефіцієнт гнучкості стиснутого елемента слід брати з Таблиці В.2 в залежності від класу гнучкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

parameter;

Q is the tolerance parameter.

(2) The tolerance parameter Q should be taken from Table B.1 for the specified tolerance class.

(3) The alloy factor and the squash limit slenderness parameter should be taken from Table B.2 according to the material buckling class as defined in EN 1999-1-1.

Таблиця В.1 – Параметр допуску Q

Table В.1 – Tolerance parameter Q

Клас допуску Tolerance class	Q
Клас 1/Class 1	16
Клас 2/Class 2	25
Класи 3 та 4/Class 3 and 4	40

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

Table В.2 – Values of $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ and μ_{θ} for external pressure

Клас втрати стійкості матеріалу Material buckling class	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

В.4 Внутрішній тиск

В.4 Internal pressure

В.4.1 Критичне значення внутрішнього тиску

В.4.1 Critical internal pressure

(1) Критичне значення внутрішнього тиску (з умов втрати стійкості) для тороконічної оболонки:

(1) The critical (buckling) internal pressure for a toriconical shell is:

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

якщо

if

$$\frac{t_T}{2r} = 0$$

$$p_{n,cr} = 1000\eta E \frac{r_T}{2r} \left(\frac{t}{2r} \right)^3 \quad (B.14)$$

якщо

if

$$\frac{r_T}{2r} \neq 0$$

де параметр η визначається за Рис. В.3.

where the parameter η should be taken from Figure B.3.

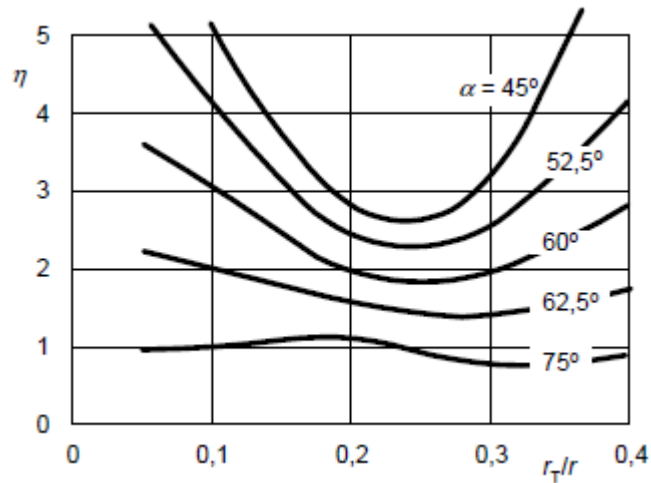


Рисунок В.3 – Параметр η для виразу (В.14)
Figure B.3 – Parameter η for expression (B.14)

(2) Критичне значення внутрішнього тиску з умов втрати стійкості для торосферичної оболонки:

(2) The critical buckling internal pressure for a torispherical shell is:

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

В.4.2 Граничний внутрішній тиск з умов рівномірно розподіленого зминання

B.4.2 Uniform squash limit internal pressure

(1) Граничний внутрішній тиск з умов рівномірно розподіленого зминання тороконічних чи торосферичних оболонок визначається за виразом (В.16) або за графіком на Рисунку В.4.

(1) The uniform squash limit internal pressure for toriconical and torispherical shells is given by expression (B.16) or may be found in the graph in Figure B.4.

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

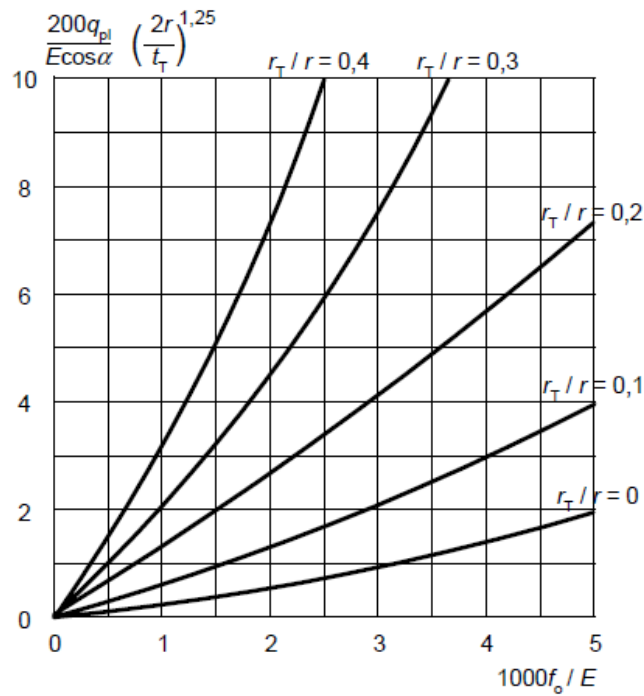


Рисунок В.4 – Пластичний внутрішній тиск для тороконічних та торосферичних оболонок
Figure В.4 – Plastic internal pressure for toriconical and torispherical shells

В.4.3 Коефіцієнт втрати стійкості під дією внутрішнього тиску

В.4.3 Internal pressure buckling parameter

(1) Коефіцієнт недосконалості слід визначати за:

(1) The imperfection factor should be obtained from:

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 2,60 \left(\frac{1}{Q} \sqrt{\frac{0,6E}{f_0}} (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) \right)^{1,44}} \quad (B.17)$$

але

but

$$\alpha_{\theta} \leq 1,00$$

де:

where:

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ коефіцієнт гнучкості стиснутого елемента;

$\bar{\lambda}_{\theta,0}$ is the squash limit slenderness parameter;

Q параметр допуску.

Q is the tolerance parameter.

(2) Параметр допуску Q береться з Таблиці В.3 для відповідного класу допуску.

(2) The tolerance parameter Q should be taken from Table B.3 for the specified tolerance class.

(3) Коефіцієнт сплаву та коефіцієнт гнучкості стиснутого елемента слід брати з Таблиці В.4 в залежності від класу гнучкості матеріалу, визначеного за EN 1999-1-1.

(3) The alloy factor and the squash limit slenderness parameter should be taken from Table B.4 according to the material buckling class as defined in EN 1999-1-1.

Таблиця В.3 – Параметр допуску Q для внутрішнього тиску

Table В.3 – Tolerance parameter Q for internal pressure

Клас допуску Tolerance class	Q
Клас 1/Class 1	16
Клас 2/Class 2	25
Класи 3 та 4/Class 3 and 4	40

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

Table В.4 – Values of $\bar{\lambda}_{\theta,0}$ and μ_{θ} for internal pressure

Клас втрати стійкості матеріалу Material buckling class	$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	μ_{θ}
A	0,20	0,35
B	0,10	0,20

ДОДАТОК НА
(довідковий)

**ПЕРЕЛІК НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ УКРАЇНИ (ДСТУ),
ІДЕНТИЧНИХ МС, ПОСИЛАННЯ НА ЯКІ Є В EN 1999-1-5:2007**

Позначення та назва європейського стандарту	Ступінь відповідності	Позначення та назва національного стандарту України (ДСТУ)
EN 1990 Eurocode - Basis of structural design	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 «Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT)»
EN 1999-1-1 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-1:2011 «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила для конструкцій (EN 1999-1-1:2007, IDT)»
EN 1999-1-2 Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part 1-2: Structural fire design	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1999-1-2:2011 «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1999-1-2:2002, IDT)»
EN 1999-1-3 Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part 1-3: Structures susceptible to fatigue	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1999-1-3:201X «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-3. Конструкції чутливі до витривалості (EN 1999-1-3:2007, IDT)»
EN 1999-1-4 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-4: Cold-formed structural sheeting.	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1999-1-4:201X «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-4. Холодноформовані листи (EN 1999-1-4:2007, IDT)»
EN 1999-1-5 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-5: Shell structures	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1999-1-5:201X «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-5. Конструкції оболонок (EN 1999-1-5:2007, IDT)»
EN 1993-1-6 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–6: Strength and Stability of Shell Structures	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1993-1-6:2012 «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1–6. Міцність та стійкість оболонок (EN 1993-1-6:2007, IDT)»
EN 1993-3-1 Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1993-3-1:201X «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 3-1. Башти, щогли і димові труби. Башти і щогли (EN 1993-3-1:2007, IDT)»
EN 1993-3-2 Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys. Chimneys	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1993-3-2:201X «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 3-2. Башти, щогли і димові труби. Димові труби (EN 1993-3-2:2007, IDT)»

EN 1993-4-1 Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 4-1: Silos	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:201X «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-4. Силоси (EN 1993-4-1:2007, IDT)»
EN 1993-4-2 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-2:Tanks	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1993-4-2:201X «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-2. Резервуари (EN 1993-4-2:2007, IDT)»
EN 1993-4-3 Eurocode 3: Design of steel structures. Part 4-3: Pipelines	IDT	ДСТУ-Н Б EN 1993-4-3:201X «Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-3. Трубопроводи (EN 1993-4-3:2007, IDT)»

Українська версія

Єврокод 9: Проектування алюмінієвих конструкцій
Частина 1-5: Конструкції оболонок

Eurocode 9 - Calcul des structures EN aluminium - Partie
1-5 : Coques

Eurocode 9 - Bemessung und Konstruktion
von Aluminiumtragwerken - Teil 1-5:
Schalentragwerke

Це корегування вступає у дію, починаючи з 4 листопада 2009 року для включення у три офіційні мовні версії EN.

Ce corrigendum prendra effet le 4 novembre 2009 pour incorporation dans les trois versions linguistiques officielles de la EN.

Die Berichtigung tritt am 4.November 2009 zur Einarbeitung in die drei offiziellen Sprachfassungen der EN in Kraft.

ЄВРОПЕЙСЬКИЙ КОМІТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦІЇ
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Центр Управління: Авеню Марні 17, В-1000 Брюссель

© 2009 CEN Всі права на використання у будь-якій формі та якимось іншим чином зарезервовані у всьому світі для національних Членів CEN.

Ref. No.:EN 1999-1-5:2007/AC:2009 D/E/F

English Version

Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-5: Shell structures

Eurocode 9 - Calcul des structures EN aluminium - Partie
1-5 : Coques

Eurocode 9 - Bemessung und Konstruktion
von Aluminiumtragwerken -Teil 1-5:
Schalenträgerwerke

This corrigendum becomes effective on 4 November 2009 for incorporation in the three official language versions of the EN.

Ce corrigendum prendra effet le 4 novembre 2009 pour incorporation dans les trois versions linguistiques officielles de la EN.

Die Berichtigung tritt am 4. November 2009 zur Einarbeitung in die drei offiziellen Sprachfassungen der EN in Kraft.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels

© 2009 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved worldwide for CEN national Members.

Ref. No.: EN 1999-1-5:2007/AC:2009 D/E/F

1 Зміна до А.1.3.1

В параграфі "(3)" замінити "меридіональне" на "кільцеве".

2 Зміни до А.1.3.2

В параграфі "(1)" замінити "меридіональної" на "кільцевої".

В параграфі "(1)" замінити рівняння "(А.12)":

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 0,2(1 - \alpha_{\theta,ref})(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) / \alpha_{\theta,ref}^2}$$

при

but
 $\alpha_{\theta} \leq 1,00$

на

with:
$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 0,2(1 - \alpha_{\theta,ref})(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) / \alpha_{\theta,ref}^2}$$

при

but
 $\alpha_{\theta} \leq 1,00$

В параграфі "(3)" замінити "меридіональний" на "кільцевий".

3 Зміни до А.1.4.2

В параграфі "(3)" замінити "меридіональної" на "зсувної".

1 Modification to A.1.3.1

Paragraph "(3)", replace "meridional" with "circumferential".

2 Modifications to A.1.3.2

Paragraph "(1)", replace "meridional" with "circumferential".

Paragraph "(1)", Equation "(A.12)", replace:

but

$$\alpha_{\theta} \leq 1,00$$

with:

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 0,2(1 - \alpha_{\theta,ref})(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) / \alpha_{\theta,ref}^2}$$

but

$$\alpha_{\theta} \leq 1,00$$

Paragraph "(3)", replace "meridional" with "circumferential".

3 Modifications to A.1.4.2

Paragraph "(3)", replace "meridional" with "shear".

Код УКНД: 91.080.10

Ключові слова: безпека, довговічність, граничні стани, матеріали, міцність вузлів, несуча здатність, проектування вузлів, алюмінієві конструкції, стійкість, оболонкові конструкції, напруження, стиск, прогин, опір.

Генеральний директор ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського», д.т.н., проф.	О. Шимановський
Заступник генерального директора д.т.н., проф. (науковий керівник)	В. Гордєєв
Завідувач НДВТР, к.т.н.	А. Гром
Завідувач групи СНТД	Г. Ленда
Завідувач групи НТД	Я. Лимар
Завідувач групи ІК	О. Кордун
Провідний інженер	Я. Левченко
Провідний інженер	С. Виноград
Перекладач	К. Павлова