НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ЄВРОКОД 3: ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСРУКЦІЙ

Частина 4-1: Силоси
(EN 1993-4-1:2007, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:201X

(Друга, остаточна редакція)

Видання офіційне

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

201X

ПЕРЕДМОВА

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

ПЕРЕКЛАД І НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ РЕДАГУВАННЯ: **В. Артюшенко**, **А. Гром,** к.т.н. (керівник розробки), **О. Кордун**, **Я. Левченко, Г. Ленда, Я. Лимар, К. Павлова, К. Цихановський,** д.т.н., **О. Шимановський**, д.т.н.

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

3 Національний стандарт відповідає EN 1993-4-1: Design of steel structures – Part 4-1: Silos (Проектування сталевих конструкцій - Частина 4-1: Силоси)

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

Мінрегіон України, 201X

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Державний стандарт України ДСТУ-Н EN 1993-4-1:20XX "Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-1: Силоси" ідентичний Європейському стандарту EN 1993-4-1:2007 "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-1: Silos" (Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій - Частина 1-4: Силоси).

EN 1993-4-1:2007 підготовлено Технічним комітетом CEN/TC 250, секретаріатом якого керує BSI.

До національного стандарту долучено англомовний текст.

На території України як національний стандарт діє ліва колонка тексту ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:2007 "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-1: Silos" (Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій - Частина 4-1: Силоси), 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.1.2 «Система надійності та безпеки в будівництві».

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» та «Бібліографічні дані» оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;
- з «Передмови до 1993-4-1» у цей «національний вступ» взяте те, що безпосередньо стосується цього стандарту;

Копії МС, неприйнятих як національні стандарти, на які є посилання в EN 1993-4-1:2007, можна отримати в Головному фонді нормативних документів ДП «УкрНДНЦ».

Організація, відповідальна за цей документ, – Товариство з обмеженою відповідальністю «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського»

При розробленні цього стандарту в україномовний текст редакційних змін, порівняно з оригіналом, не внесено.

ЗМІСТ

ВСТУП			**FOREWORD**	VII
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
Додаткова інформація щодо EN 1993-4-1			Additional information specific to EN 1993-4-1	5
Національний додаток до EN 1993-4-1			National Annex for EN 1993-4-1	6
1	**Загальні положення**		**1** **General**	8
1.1	Галузь застосування		1.1 Scope	8
1.2	Нормативні посилання		1.2 Normative references	9
1.3	Припущення		1.3 Assumptions	10
1.4	Відмінність між принципами та правилами застосування		1.4 Distinction between principles and application rules	11
1.5	Терміни та визначення		1.5 Terms and definitions	11
1.6	Позначення використані у розділі 4 Єврокода 3		1.6 Symbols used in Part 4.1 of Eurocode 3	15
1.7	Умовні позначення		1.7 Sign conventions	20
1.8	Одиниці виміру		1.8 Units	26
2	**Основи проектування**		**2** **Basis of design**	28
2.1	Вимоги		2.1 Requirements	28
2.2	Розмежування надійності		2.2 Reliability differentiation	28
2.3	Граничні стани		2.3 Limit states	30
2.4	Впливи та екологічні наслідки		2.4 Actions and environmental effects	31
2.5	Властивості матеріалу		2.5 Material properties	31
2.6	Геометричні дані		2.6 Geometrical data	32
2.7	Моделювання бункера для визначення наслідків впливів		2.7 Modelling of the silo for determining action effects	32
2.8	Проектування, що супроводжується тестуванням		2.8 Design assisted by testing	33
2.9	Наслідки дій для перевірки граничного стану		2.9 Action effects for limit state verifications	33
2.10	Довговічність		2.10 Durability	35
2.11	Вогнестійкість		2.11 Fire resistance	35
3	**Властивості матеріалів**		**3** **Properties of materials**	36
3.1	Загальні положення		3.1 General	36
3.2	Конструкційні сталі		3.2 Structural steels	36
3.3	Неіржавіючі сталі		3.3 Stainless steels	37
3.4	Спеціальні леговані сталі		3.4 Special alloy steels	37
3.5	Вимоги до міцності		3.5 Toughness requirements	38
4	**Основа структурного аналізу**		**4** **Basis for structural analysis**	39
4.1	Основні граничні стани		4.1 Ultimate limit states	39
4.2	Аналіз конструкції оболонкового бункера		4.2 Analysis of the structure of a shell silo	41
4.3	Аналіз коробчастої конструкції прямокутного бункера		4.3 Analysis of the box structure of a rectangular silofailure	46

4.4 Еквівалентні ортотропні властивості обшивки з гофрованого листа
5 Проектування стінок циліндру
5.1 Основа
5.2 Відмінності між формами циліндричних оболонок
5.3 Опір циліндричних стінок бункеру
5.4 Основні умови підтримання циліндричних стінок
5.5 Деталізація отворів в циліндричних стінках
5.6 Граничні експлуатаційні стани
6 Проектування конічних бункерів-хоперів
6.1 Основа
6.2 Відмінності між формами оболонок бункера
6.3 Опір конічних бункерів-хоперів
6.4 Розгляд спеціальних конструкцій бункерів
6.5 Експлуатаційна придатність граничних станів
7 Проектування конструкцій круглого конічного даху
7.1 Основа
7.2 Відмінності між формами конструкції даху
7.3 Опір круглих конічних дахів бункера
8 Проектування перехідних сполучень і підтримувальних кільцевих балок
8.1 Основа
8.2 Аналіз сполучення
8.3 Опір конструкцій
8.4 Перевірка граничних станів
8.5 Розгляд схем розташування опорних елементів сполучення
9 Проектування прямокутних бункерів з плоскими бічними стінками
9.1 Основа
9.2 Класифікація конструкційних форм
9.3 Опір вертикальних стінок без посилення
9.4 Опір стінок бункера з гофрованих листів з посиленням
9.5 Бункери з внутрішніми затяжками
9.6 Міцність пірамідальних бункерів
9.7 Вертикальні ребра жорсткості на коробчатих стінках
9.8 Експлуатаційна придатність граничних станів

4.4 Equivalent orthotropic properties of corrugated sheeting 48
5 Design of cylindrical walls 51
5.1 Basis 51
5.2 Distinctions between cylindrical shell forms 52
5.3 Resistance of silo cylindrical walls 53
5.4 Special support conditions for cylindrical walls 87
5.5 Detailing for openings in cylindrical walls 95
5.6 Serviceability limit states 96
6 Design of conical hoppers 98
6.1 Basis 98
6.2 Distinctions between hopper shell forms 99
6.3 Resistance of conical hoppers 99
6.4 Considerations for special hopper structures 106
6.5 Serviceability limit states 109
7 Design of circular conical roof structures 110
7.1 Basis 110
7.2 Distinctions between roof structural forms 110
7.3 Resistance of circular conical silo roofs 110
8 Design of transition junctions and supporting ring girders 112
8.1 Basis 112
8.2 Analysis of the junction 115
8.3 Structural resistances 124
8.4 Limit state verifications 130
8.5 Considerations concerning support arrangements for the junction 134
9 Design of rectangular and planar-sided silos 136
9.1 Basis 136
9.2 Classification of structural forms 136
9.3 Resistance of unstiffened vertical walls 137
9.4 Resistance of silo walls composed of stiffened and corrugated plates 138
9.5 Silos with internal ties 142
9.6 Strength of pyramidal hoppers 145
9.7 Vertical stiffeners on box walls 147
9.8 Serviceability limit states 147

Додаток А [Довідковий] Спрощені правила для циліндричних бункерів класу наслідків 1 **Annex A (Informative) Simplified rules for circular silos in Consequence Class 1** 149

Додаток В [Довідковий] Вираз мембранних напружень в конічних бункерах **Annex B (Informative) Expressions for membrane stresses in conical hoppers** 158

Додаток С [Довідковий] Розподіл тиску вітру відносно конструкцій циліндричного бункера **Annex C (Informative) Distribution of wind pressure around circular silo structures** 160

Технічна поправка Technical amendment 163

ВСТУП

Цей Європейський Стандарт EN 1993-4-1, Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій, підготовлений Технічним комітетом CEN/TC250 "Будівельні Єврокоди", секретаріат якого підтримує BSI. CEN/TC250 відповідальний за всі Конструктивні Єврокоди.

Цьому Європейському стандарту буде наданий статус національного з публікацією ідентичного тексту, або схваленням, до серпня 2007 року, і альтернативні національні стандарти повинні бути відмінені до березня 2010 року.

Цей Єврокод замінює ENV 1993-4-1:1999.

У відповідності з внутрішніми постановами CEN/CENELEC національні органи зі стандартизації наступних країн зобов'язані прийняти цей Європейський стандарт: Австрія, Бельгія, Велика Британія, Греція, Данія, Ірландія, Ісландія, Іспанія, Італія, Люксембург, Мальта, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Португалія, Фінляндія, Франція, Чеська Республіка, Швейцарія, Швеція.

FOREWORD

This European Standard EN 1993-4-1, "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-1: Silos", has been prepared by Technical Committee CEN/TC250 «Structural Eurocodes», the Secretariat of which is held by BSI. CEN/TC250 is responsible for all Structural Eurocodes.

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 latest by March 2010.

This Eurocode supersedes ENV 1993-4-1:1999.

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

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ЄВРОКОД 3: ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ЧАСТИНА 4-1: СИЛОСИ

ЕВРОКОД 3: ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ЧАСТЬ 4-1: БУНКЕРЫ

EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES
PART 4-1: SILOS

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 та узгодження технічних умов.

У 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 комплекту першого покоління Європейських кодів у 80-х роках.

У 1989 році Комісія та держави-члени EU (Європейської Спільноти) та EFTA (Європейської асоціації вільної торгівлі) на основі угоди[1] між Комісією та CEN (Європейським комітетом із стандартизації) вирішили передати підготовку та публікацію Єврокодів CEN за допомогою серії Мандатів, що надало б Єврокодам у майбутньому статусу

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 1980‟s.

In 1989, the Commission and the Member States of the EU and EFTA decided, on the basis of an agreement[1] between the Commission and CEN, to transfer the preparation and the publication of the Eurocodes to CEN through a series of Mandates, in order to provide them with a future status of European Standard (EN). This

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 – CPD – та Директив Ради 93/37/ЕЕС, 92/50/ЕЕС та 89/440/ЕЕС відносно суспільних робіт та послуг і еквівалентних директив EFTA, започаткованих, щоб допомогти заснуванню внутрішнього ринку).

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).

Структурна програма Єврокодів включає стандарти, які в основному складаються з декількох частин:
EN 1990 Єврокод: Основи проектування конструкцій
EN 1991 Єврокод 1: Навантаження на конструкції
EN 1992 Єврокод 2: Проектування бетонних конструкцій
EN 1993 Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій
EN 1994 Єврокод 4: Проектування сталебетонних 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 конструкцій при сейсмічному навантаженні
EN 1999 Єврокод 9: Проектування алюмінієвих конструкцій

The Structural Eurocode programme comprises the following standards generally consisting of a number of Parts:
EN 1990 Eurocode: 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

Стандарти Єврокодів визнають відповідальність регуляторних органів держав-членів та захищають їх право на призначення величин, які пов‟язані з регулюванням питань безпеки на національному рівні там, де вони відрізняються.

Eurocode standards recognise the responsibility of regulatory authorities in each Member State and have safeguarded their right to determine values related to regulatory safety matters at national level where these continue to vary from State to State.

[1]Угода між Комісією Європейських Спільнот і Європейським комітетом стандартизації (CEN) щодо роботи над Єврокодами для проектування будівель і споруд (CONSTRUCT 89/019).

[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).

Статус та галузь застосування Єврокодів

Держави-члени EU та EFTA визнають, що Єврокоди діють як еталонні документи для таких цілей:
– як засіб доведення відповідності 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 документами[2] розділу 12 CPD, незважаючи та те, що вони мають різну природу з гармонізованими стандартами на вироби[3]. Таким чином, технічні аспекти, які випливають 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.

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 N°1 – Mechanical resistance and stability – and Essential Requirement N°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 Documents[2] referred to in Article 12 of the CPD, although they are of a different nature from harmonised product standards[3]. 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.

---

[2]Відповідно до Ст. 3.3 CPD, Основні вимоги (ER) отримають конкретну форму у Тлумачних документах для створення необхідних в‟язів між Основними вимогами та мандатами на hEN і ETA.

[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, тощо;
c) слугувати як рекомендація для встановлення узгоджених стандартів і настанов для Європейського технічного ухвалення.
Єврокоди фактично відіграють подібну роль у сфері ER 1 і частині ER 2.

[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.

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

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.

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 можуть супроводжуватися Національним додатком.

Національний додаток може також включати інформацію щодо 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 побудовані у зацікавленій країні, а саме:
– значення і/або класи, де в Єврокоді даються альтернативи;
– значення, які слід використовувати, коли в Єврокоді надається тільки позначення;
– специфічні дані країни (географічні, кліматичні тощо), наприклад, карта снігу;
– процедура, яка використовується у випадку, коли альтернативні процедури обумовлені в Єврокоді.
Вони можуть також містити:
– рекомендації щодо застосування довідкових додатків;
– посилання на додаткову інформацію, яка не суперечить нормативним вимогам і допомагає при користуванні Єврокодами.

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.

The National annex 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 and/or classes where alternatives are given in the Eurocode,
– values to be used where a symbol only is given in the Eurocode,
– country specific data (geographical, climatic, etc), e.g. snow map,
– the procedure to be used where alternative procedures are given in the Eurocode.

It may also contain:
− decisions on the application of informative annexes,
– references to non-contradictory complementary information to assist the user to apply the Eurocode.

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

Необхідна узгодженість між гармонізованими технічними специфікаціями для будівельних виробів та технічними правилами для будівель і споруд[4]. 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.

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 works[4]. Furthermore, all the information accompanying the CE Marking of the construction products which refer to Eurocodes should clearly mention which Nationally Determined Parameters have been taken into account.

Додаткова інформація щодо EN 1993-4-1

EN 1993-4-1 надає вказівки щодо будівельного проектування силосів.
EN 1993-4-1 надає правила проектування, які доповнюють базові правила багатьох частин EN 1993-1.
EN 1993-4-1 призначено для замовників, проектувальників, підрядників і контролюючих органів.
EN 1993-4-1 необхідно застосовувати у поєднанні з EN 1990, з EN 1991-4, з іншими частинами EN 1991, з EN 1993-1-6 і EN 1993-4-2, з іншими частинами EN 1993, з EN 1992 і з іншими частинами EN 1994 до EN 1999, які відносяться до проектування силосів. Питання, які вже розкриваються в згаданих документах, не повторюються.
Числові значення для часткових коефіцієнтів та інших параметрів надійності рекомендуються як основні значення, які забезпечують прийнятний рівень надійності. Вони були обрані при допущенні, що забезпечено відповідний рівень компетентності робітників та якісне управління.
Коефіцієнти безпеки для силосів «товарного типу» (фабричного виробництва) можуть бути вказані відповідними уповноваженими органами. До силосів «товарного типу» коефіцієнти, надані у 2.10, застосовуються лише у якості вказівок. Вони наведені, щоб показати вірогідні рівні, які необхідні для досягнення надійності у сумісності з іншими проектами.

[4]Див. Ст. 3.3 і Ст.12 CPD, а також 4.2, 4.3.1, 4.3.2 та 5.2 ID 1.

Additional information specific to EN 1993-4-1

EN 1993-4-1 gives design guidance for the structural design of silos.
EN 1993-4-1 gives design rules that supplement the generic rules in the many parts of EN 1993-1.
EN 1993-4-1 is intended for clients, designers, contractors and relevant authorities.
EN 1993-4-1 is intended to be used in conjunction with EN 1990, with EN 1991-4, with the other Parts of EN 1991, with EN 1993-1-6 and EN 1993-4-2, with the other Parts of EN 1993, with EN 1992 and with the other Parts of EN 1994 to EN 1999 relevant to the design of silos. Matters that are already covered in those documents are not repeated.

Numerical values for partial factors and other reliability parameters are recommended as basic values that provide an acceptable level of reliability. They have been selected assuming that an appropriate level of workmanship and quality management applies.

Safety factors for „product type" silos (factory production) can be specified by the appropriate authorities. When applied to „product type" silos, the factors in 2.10 are for guidance purposes only. They are provided to show the likely levels needed to achieve consistent reliability with other designs.

[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.

Національний додаток до EN 1993-4-1

Цей стандарт надає альтернативні процедури, значення і рекомендації для класів із примітками, які можуть вказувати місце, де необхідно зробити національний вибір. Таким чином, національний стандарт, який впроваджує EN 1993-4-1, повинен мати Національний додаток, який включав би усі національно визначені параметри, які використовуються при проектуванні будівель та цивільних споруд, що будуть побудовані у відповідній країні.

Національним вибором дозволено ввійти до EN 1993-4-1 за допомогою:

- 2.2 (1)
- 2.2 (3)
- 2.9.2.2 (3)
- 3.4 (1)
- 4.1.4 (2) і (4)
- 4.2.2.3 (6)
- 4.3.1 (6) і (8)
- 5.3.2.3 (3)
- 5.3.2.4 (10), (12) і (15)
- 5.3.2.5 (10) і (14)
- 5.3.2.6 (3) і (6)
- 5.3.2.8 (2)
- 5.3.3.5 (1) і (2)
- 5.3.4.3.2 (2)
- 5.3.4.3.3 (2) і (5)
- 5.3.4.3.4 (5)
- 5.3.4.5 (3)
- 5.4.4 (2), (3) і (4)
- 5.4.7 (3)
- 5.5.2 (3)
- 5.6.2 (1) і (2)
- 6.1.2 (4)
- 6.3.2.3 (2) і (4)
- 6.3.2.7 (3)
- 7.3.1 (4)
- 8.3.3 (4)
- 8.4.1 (6)
- 8.4.2 (5)
- 8.5.3 (3)
- 9.5.1 (3) і (4)
- 9.5.2 (5)
- 9.8.2 (1) і (2)
- A.2 (1) і (2)
- A.3.2.1 (6)
- A.3.2.2 (6)

National annex for EN 1993-4-1

This standard gives alternative procedures, values and recommendations for classes with notes indicating where National choices may have to be made. Therefore the National Standard implementing EN 1993-4-1 should have a National Annex containing all Nationally Determined Parameters to be used for the design of buildings and civil engineering works to be constructed in the relevant country.

National choice is allowed in EN 1993-4-1 through:

- 2.2 (1)
- 2.2 (3)
- 2.9.2.2 (3)
- 3.4 (1)
- 4.1.4 (2) and (4)
- 4.2.2.3 (6)
- 4.3.1 (6) and (8)
- 5.3.2.3 (3)
- 5.3.2.4 (10), (12) and (15)
- 5.3.2.5 (10) and (14)
- 5.3.2.6 (3) and (6)
- 5.3.2.8 (2)
- 5.3.3.5 (1) and (2)
- 5.3.4.3.2 (2)
- 5.3.4.3.3 (2) and (5)
- 5.3.4.3.4 (5)
- 5.3.4.5 (3)
- 5.4.4 (2), (3) and (4)
- 5.4.7 (3)
- 5.5.2 (3)
- 5.6.2 (1) and (2)
- 6.1.2 (4)
- 6.3.2.3 (2) and (4)
- 6.3.2.7 (3)
- 7.3.1 (4)
- 8.3.3 (4)
- 8.4.1 (6)
- 8.4.2 (5)
- 8.5.3 (3)
- 9.5.1 (3) and (4)
- 9.5.2 (5)
- 9.8.2 (1) and (2)
- A.2 (1) and (2)
- A.3.2.1 (6)
- A.3.2.2 (6)

– A.3.2.3 (2)	– A.3.2.3 (2)
– A.3.3 (1), (2) і (3)	– A.3.3 (1), (2) and (3)
– A.3.4 (4)	– A.3.4 (4)

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Галузь застосування

(1) Частина 4.1 Еврокода 3 забезпечує принципи і правила застосування для будівельного проектування сталевих бункерів круглої або прямокутної форми, встановлюваних вільно або на опорах.

(2) Положення, що наведені в цій частині, змінюють або замінюють собою положення EN 1993-1.

(3) Ця частина стандарту, має відношення тільки до вимог опору і стійкості сталевих силосів. Що стосується інших вимог (таких як експлуатаційна безпека, функціональна продуктивність, виготовлення і монтаж, контроль якості, деталей на кшталт оглядових колодязів, фланців, завантажувальних пристроїв, заслінок розвантажувального люка, подаючих механізмів тощо), див. відповідні стандарти.

(4) Положення, які відносяться до спеціальних вимог по сейсмічному проектуванню, передбачені EN 1998-4, який доповнює або адаптує положення Еврокода 3 спеціально для цієї мети.

(5) Проектування несучих конструкцій для силосів розглядається в EN 1993-1-1. Вважається, що несуча конструкція складається з усіх будівельних деталей, розташованих нижче нижньої полиці самого нижнього поясу бункера, див. рисунок 1.1.

(6) Основи проектування залізобетонних конструкцій для сталевих силосів розглядаються в EN 1992 та EN 1997.

(7) Числові значення особливих впливів на сталеві силоси повинні враховуватися при проектуванні відповідно до EN 1991-4 Дії на бункери і резервуари.

1 GENERAL

1.1 Scope

(1) Part 4.1 of Eurocode 3 provides principles and application rules for the structural design of steel silos of circular or rectangular plan-form, being free standing or supported.

(2) The provisions given in this Part supplement modify or supersede the equivalent provisions given in EN 1993-1.

(3) This part is concerned only with the requirements for resistance and stability of steel silos. For other requirements (such as operational safety, functional performance, fabrication and erection, quality control, details like man-holes, flanges, filling devices, outlet gates and feeders etc.), see the relevant standards.

(4) Provisions relating to special requirements of seismic design are provided in EN 1998-4, which complements or adapts the provisions of Eurocode 3 specifically for this purpose.

(5) The design of supporting structures for the silo are dealt with in EN 1993-1-1. The supporting structure is deemed to consist of all structural elements beneath the bottom flange of the lowest ring of the silo, see figure 1.1.

(6) Foundations in reinforced concrete for steel silos are dealt with in EN 1992 and EN 1997.

(7) Numerical values of the specific actions on steel silos to be taken into account in the design are given in EN 1991-4 Actions in Silos and Tanks.

(8) В цій Частині 4.1 не розглядаються:
− вогнетривкість;
− бункери з внутрішніми ємностями і внутрішніми конструкціями;
− бункери місткістю менше 10 тон;
− випадки, коли потрібне використання особливих заходів для попередження наслідків нещасних випадків.

(8) This Part 4.1 does not cover:
− resistance to fire;
− silos with internal subdivisions and internal structures;
− silos with capacity less than 10 tonnes;
− cases where special measures are necessary to limit the consequences of accidents.

(9) Якщо цей стандарт застосовується до силосів круглої конфігурації, геометрична форма має бути обмежена асиметричними конструкціями, і дія на них може бути асиметричною, а їх опори можуть викликати у силосів реакції, які не є віссесиметричними.

(9) Where this standard applies to circular planform silos, the geometric form is restricted to axisymmetric structures, but the actions on them may be unsymmetrical, and their supports may induce forces in the silo that are not axisymmetrical.

1.2 Нормативні посилання

1.2 Normative references

Цей стандарт містить датовані і недатовані посилання, положення з інших стандартів. Ці нормативні посилання наведено у відповідних місцях у тексті, а публікації перераховані нижче. Для датованих посилань наступні поправки або перегляди будь-який з цих публікацій належать до Європейського стандарту тільки при внесенні до нього змін або переглядів. Для недатованих посилань застосовують останнє видання публікації.

This European Standard incorporates, by dated and undated reference, provisions from other standards. 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 the European Standard only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies.

EN 1090 Проектування сталевих конструкцій;
EN 1990 Єврокод: Основи проектування;
EN 1991 Еврокод1: Дії на конструкції:
Частина 1.1 Щільність, власна вага і корисні навантаження для будівель;
Частина 1.2 Дії на конструкції. Дії на конструкції незахищені від вогню;
Частина 1.3 Дії на конструкції. Снігові навантаження;
Частина 1.4 Дії на конструкції. Вітрові навантаження;
Частина 1.5 Дії на конструкції. Температурні впливи;
Частина 1.6 Дії на конструкції. Конструкційні навантаження;
Частина 1.5 Дії на конструкції. Випадкові дії;
Частина 4 Дії на силоси і резервуари;
EN 1993 Еврокод 3: Проектування сталевих конструкцій:

EN 1090 Execution of steel structures;

EN 1990 Eurocode: Basis of design;
EN 1991 Eurocode 1: Actions on structures:
Part 1.1: Actions on structures – Densities, self-weight and imposed loads for buildings;
Part 1.2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire;
Part 1.3: Actions on structures – Snow loads;

Part 1.4: Actions on structures – Wind loads;

Part 1.5: Actions on structures – Thermal loads;
Part 1.6: Actions on structures – Construction loads;
Part 1.5: Actions on structures – Accidental actions;
Part 4: Actions on silos and tanks;
EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures:

Частина 1.1 Загальні правила і правила для будівель;
Частина 1.3 Холодно формовані тонкостінні елементи і листи;
Частина 1.4 Нержавіючі сталі;
Частина 1.6 Міцність і стійкість оболонкових конструкцій;
Частина 1.7 Плоскостіні конструкції із зварних листів з поперечним навантаженням;
Частина 1.8 Проектування з'єднань;
Частина 1.9 Втомна міцність сталевих конструкцій;
Частина 1.10 Вибір сталі з урахуванням ударної в'язкості і опору утворенню наскрізних тріщин;
Частина 4.2 Резервуари;
EN 1997 Еврокод 7: Геотехнічне проектування;
EN 1998 Еврокод 8: Положення по проектуванню сейсмостійких конструкцій;
Частина 4 Силоси, резервуари і трубопроводи;
EN 10025 Гарячий прокат з нелегованої конструкційної сталі - технічні умови поставки;

EN 10147 Гарячекатані плоскі вироби зі сталей високої межі текучості для холодного штампування;
ISO 1000 Одиниць СІ;
ISO 3898 Основи проектування конструкцій. Умовні знаки. Загальні позначення;
ISO 4997 Конструкційні властивості сталевих листів холодного прокату;
ISO 8930 Загальні принципи надійності конструкцій. Список еквівалентних термінів.

Part 1.1: General rules and rules for buildings;

Part 1.3: Cold formed thin gauge members and sheeting;
Part 1.4: Stainless steels;
Part 1.6: Strength and stability of shell structures;
Part 1.7: Planar plated structures loaded transversely;

Part 1.8: Design of joints;
Part 1.9: Fatigue strength of steel structures;

Part 1.10: Selection of steel for fracture toughness and through-thickness properties;

Part 4.2: Tanks;
EN 1997 Eurocode 7: Geotechnical design;

EN 1998 Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures;
Part 4: Silos, tanks and pipelines;

EN 10025 Hot rolled products of non-alloy structural steels - technical delivery conditions;

EN 10147 Hot-rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming;

ISO 1000 SI Units;
ISO 3898 Bases for design of structures - Notation - General symbols;

ISO 4997 Cold reduced steel sheet of structural quality;
ISO 8930 General principles on reliability for structures - List of equivalent terms.

1.3 Припущення

(1) В доповнення до загальних припущень, вказаних в EN 1990, застосовуються наступні допуски:
- виготовлення і монтаж повинні відповідати EN 1090-2.

1.3 Assumptions

(1) In addition to the general assumptions of EN 1990 the following assumptions apply:

– fabrication and erection complies with EN 1090-2

1.4 Відмінність між принципами ТА правилами застосування

(1) Див 1.4 EN 1990.

1.5 Терміни ТА визначення

(1) Терміни, приведені в 1.5 EN 1990, для загального застосування в Єврокодах по будівництву і визначенню, приведені в ISO 8930, застосовуються до даної частини 4.1 EN 1993, якщо не вказано інше. Спеціально з метою даної частини 4.1 введені наступні додаткові визначення:

1.5.1 ***Оболонка***
Формована конструкція із зігнутого тонкого листа.

1.5.2 ***Вісесиметрична оболонка***
Конструкція оболонки, геометрія якої визначається за допомогою обертання меридіанальної лінії відносно центральної осі.

1.5.3 ***Короб***
Закрита тривимірна конструкція, виготовлена з набору плоских листів. У цілях цього стандарту короб має розміри, як правило, сумірні на всіх напрямках.

1.5.4 ***Меридіальний напрям***
Дотична до будь-якої точки стінки силоса у вертикальній площині. Вона змінюється залежно від даного конструктивного елементу. Як напрямок дощової краплі яка стікає по вертикальній або похилій поверхні конструкції.

1.5.5 ***Кільцевий напрям***
Горизонтальна дотична до будь-якої точки стінки силоса. Вона змінюється по периметру бункера, розташована в горизонтальній площині і по дотичній відносно стінки бункера, незалежно від того, має бункер круглу або прямокутну конфігурацію.

1.4 Distinction between Principles and Application rules.

(1) See 1.4 in EN 1990.

1.5 Terms and definitions

(1) The terms that are defined in 1.5 in EN 1990 for common use in the Structural Eurocodes and the definitions given in ISO 8930 apply to this Part 4.1 of EN 1993, unless otherwise stated, but for the purposes of this Part 4.1 the following supplementary definitions are given:

1.5.1 ***Shell***
A structure formed from a curved thin plate.

1.5.2 ***Axisymmetric shell***
A shell structure whose geometry is defined by rotation of a meridional line about a central axis.

1.5.3 ***Box***
A structure formed from an assembly of flat plates into a three-dimensional enclosed form. For the purposes of this Standard, the box has dimensions that are generally comparable in all directions.

1.5.4 ***Meridional direction***
The tangent to the silo wall in a vertical plane at any point. It varies according to the structural element being considered. Alternatively, it is the vertical or inclined direction on the surface of the structure that a rain drop would take in sliding down the surface.

1.5.5 ***Circumferential direction***
The horizontal tangent to the silo wall at any point. It varies around the silo, lies in the horizontal plane and is tangential to the silo wall irrespective of whether the silo is circular or rectangular in plan.

1.5.6 ***Серединна поверхня***
Цей термін використовується для позначення як вільної від напружень середньої поверхні, коли оболонка формується в результаті простого вигину, так і середній поверхні плоского листа, що становить частину короба.

1.5.6 ***Middle surface***
This term is used to refer to both the stress-free middle surface when a shell is in pure bending and the middle plane of a flat plate that forms part of a box.

1.5.7 ***Розподіл ребер жорсткості***
Відстань між серединами поздовжніх осей двох суміжних паралельних ребер жорсткості. На додаток до частини 1 стандарта EN 1993 (і частини 4 EN 1991) в цілях цієї частини 4.1 застосовуються наступні терміни (див. рисунок 1.1).

1.5.7 ***Separation of stiffeners***
The centre to centre distance between the longitudinal axes of two adjacent parallel stiffeners. Supplementary to Part 1 of EN 1993 (and Part 4 of EN 1991), for the purposes of this Part 4.1, the following terminology applies, see figure 1.1.

1.5.8 ***Бункер***
Бункер є контейнером для зберігання гранульованих часток твердих матеріалів. В цьому стандарті передбачається, що він має вертикальну форму і завантажується згори, завдяки силі тяжіння твердих матеріалів. Термін силос включає усі конструктивні конфігурації для зберігання часток твердих матеріалів, які в інших випадках можна було б назвати засік, воронка, сховище для зерна або бункер.

1.5.8 ***Silo***
A silo is a vessel for storing particulate granular solids. In this Standard, it is assumed to have a vertical form with solids being added by gravity at the top. The term silo includes all forms of particulate solids storage structure, that might otherwise be referred to as a bin, hopper, grain tank or bunker.

1.5.9 ***Барабан-циліндр***
Барабан-циліндр - це вертикальна секція бункера, обмежена стінками.

1.5.9 ***Barrel***
The barrel is the vertical walled section of a silo.

1.5.10 ***Хопер***
Хопер є секцією, що звужується у напрямку до дна бункера. Він застосовується для подачі твердих матеріалів під силою тяжіння в розвантажувальний пристрій.

1.5.10 ***Hopper***
A hopper is a converging section towards the bottom of a silo. It is used to channel solids towards a gravity discharge outlet.

1.5.11 ***З'єднання***
З'єднання - це точка сполучення двох і більше зігнутих елементів оболонки або двох і більше листових елементів короба. З'єднання може включати або не включати ребро жорсткості: точку сполучення кільцевого ребра жорсткості з оболонкою або коробом можна розглядати як з'єднання.

1.5.11 ***Junction***
A junction is the point at which any two or more shell segments, or two or more flat plate elements of a box meet. It can include a stiffener or not: the point of attachment of a ring stiffener to the shell or box may be treated as a junction.

1.5.12 ***Перехідне з'єднання***
Перехідне з'єднання- це з'єднання між циліндром і хоппером. Це з'єднання може бути розташоване біля основи циліндра або в його середини.

1.5.12 ***Transition junction***
The transition junction is the junction between the barrel and hopper. The junction can be at the base of the barrel or part way down it.

1.5.13 ***Юбка***
Юбка – це частина циліндра, яка знаходиться нижче перехідного з'єднання: вона відрізняється від верхньої частини тим, що не стикається з сипучими матеріалами, що зберігаються.

1.5.13 ***Skirt***
The skirt is that part of the barrel which lies below the transition junction: it differs from the higher part in that it has no contact with the stored bulk solids.

1.5.14 ***Пояс обшивки***
Пояс або ряд – це один пласт сталевих листів, що утворює один рівень бочкоподібного циліндру бункера.

1.5.14 ***Strake***
A strake or course is a single layer of steel plates used to form one level of the cylindrical barrel of a silo.

1.5.15 ***Повздовжнє ребро жорсткості***
Повздовжнє ребро жорсткості – це елемент локального укріплення конструкції, розташований уздовж меридіана оболонки, який утворює оболонку обертання. Воно встановлюється для підвищення стійкості, опору локальним навантаженням або осьовим навантаженням. Воно не призначене для забезпечення несучої здатності відносно основного навантаження на згин внаслідок поперечного напруження.

1.5.15 ***Stringer stiffener***
A stringer stiffener is a local stiffening member that follows the meridian of a 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 or to carry axial loads. It is not intended to provide a primary load carrying capacity for bending due to transverse loads.

1.5.16 ***Ребро***
Ребро – це локальний елемент, який забезпечує несучу здатність відносно основного навантаження при напруженні, що викликає згин нижче меридіальної лінії оболонки або плоских листів, і за допомогою обертання утворює оболонку. Це також вертикальне ребро жорсткості короба. Воно застосовується для розподілу навантажень на конструкцію, що виникають в результаті дії на згин.

1.5.16 ***Rib***
A rib is a local member that provides a primary load carrying path for loads causing bending down the meridian of a shell or flat plate, representing a generator of the shell of revolution or a vertical stiffener on a box. It is used to distribute transverse loads on the structure by bending action.

1.5.17 ***Кільцеве ребро жорсткості***
Кільцеве ребро жорсткості – це локальний зміцнюючий елемент, який проходить по колу конструкції в заданій точці на меридіані. Передбачається, що це ребро не має жорсткості в меридіальній площині конструкції. Воно забезпечує підвищеня стійкості або переймає на себе локальні

1.5.17 ***Ring stiffener***
A ring stiffener is a local stiffening member that passes around the circumference of the structure at a given point on the meridian. It is assumed to have no stiffness in the meridional plane of the structure. It is provided to increase the stability or to introduce local loads, not as a primary load-carrying element.

навантаження, але не в якості елементу, несучого основне навантаження. У круглій оболонці воно проходить по колу, а в прямокутних конструкціях набуває прямокутної форми згідно конфігурації перерізу.

In a shell of revolution it is circular, but in rectangular structures is takes the rectangular form of the plan section.

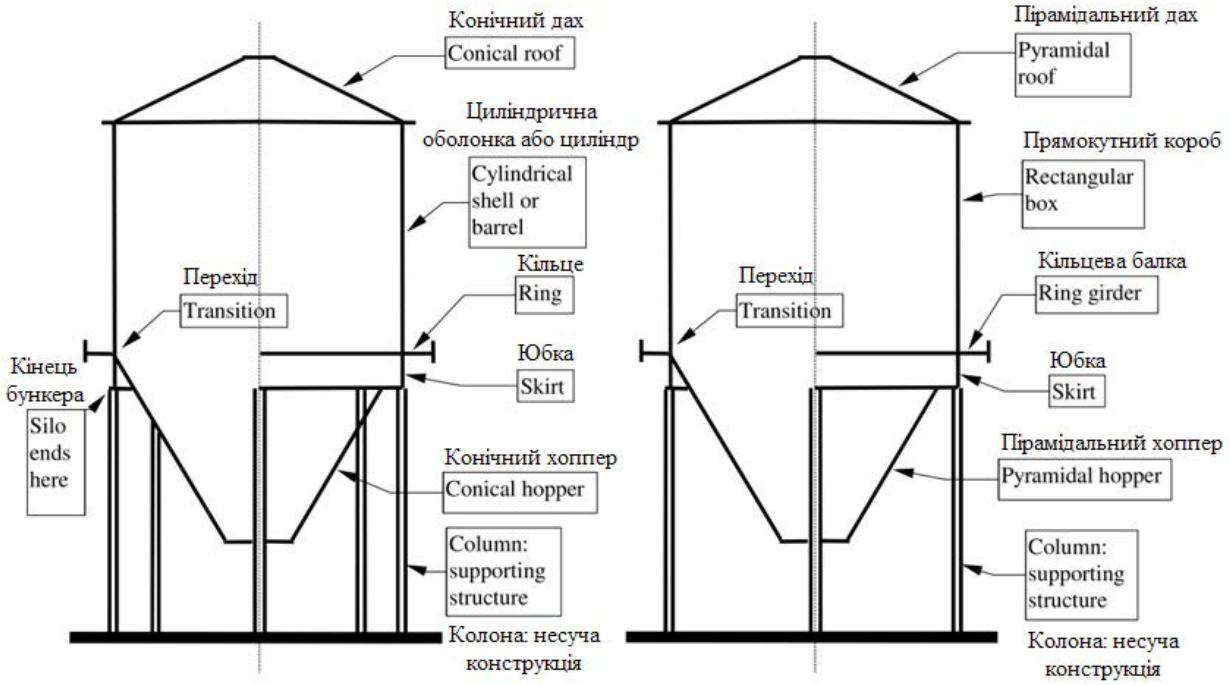
1.5.18 ***Розподілені ребра жорсткості***

Ребра жорсткості називають розподіленими, якщо властивості стінки оболонки і окремих ребер розглядаються у рамках складеної секції з шириною рівною числу кратному розподілу ребер жорсткості.

Властивості жорсткості стінки оболонки з розподіленими ребрами жорсткості є ортотропними, та за умов навантаження з ексценриситетом, призводять до сумісної роботи конструкції на згин та розтяг.

1.5.18 ***Smeared stiffeners***

Stiffeners are said to be smeared when the properties of the shell wall and the individual stiffeners are treated as a composite section using a width equal to an integer multiple of the separation of the stiffeners. The stiffness properties of a shell wall with smeared stiffeners are orthotropic with eccentric terms leading to coupling between bending and stretching behaviour.



а) бункер круглої конфігурації;
a) Circular planform silo

б) бункер прямокутної конфігурації
b) Rectangular planform silo

Рисунок 1.1 Термінологія, використовувана в конструкції бункера
Figure 1.1 Terminology used in silo structures

1.5.19 ***Кільце основи***

Кільце основи – це конструктивний елемент, який опоясує конструкцію по колу біля основи і забезпечує кріплення конструкції на фундаменті або на іншому елементі. Воно потрібне для забезпечення відповідності вказанних граничних умов

1.5.19 ***Base ring***

A base ring is a structural member that passes around the circumference of the structure at the base and provides means of attachment of the structure to a foundation or other element. It is required to ensure that the assumed boundary conditions are achieved in practice.

фактичним.

1.5.20 ***Кільцева балка або кільцева перекладина***

Кільцева балка або кільцева перекладина – це кільцеве ребро жорсткості, яке має жорсткість на згин і міцність як в площині круглого перерізу оболонки, так і в площині перерізу конструкції, воно має прямокутну конфігурацію. Ребро ортогональне відносно цієї площини. Це ребро є основним несучим елементом навантаження і розподіляє локальні навантаження на оболонку або коробчату конструкцію.

1.5.20 ***Ring girder or ring beam***

A ring girder or ring beam is a circumferential stiffener which has bending stiffness and strength both in the plane of the circular section of a shell or the plan section of a rectangular structure and also normal to that plane. It is a primary load-carrying element, used to distribute local loads into the shell or box structure.

1.5.21 ***Суцільна опора***

Бункер має суцільну опору, якщо у будь-якій позиції по периметру кола він підтримується ідентичним способом. Незначні відхилення від цієї умови (наприклад, наявність невеликого отвору) не повинні впливати на застосування цього визначення.

1.5.21 ***Continuous support***

A continuously supported silo is one in which all positions around the circumference are supported in an identical manner. Minor departures from this condition (e.g. a small opening) need not affect the applicability of the definition.

1.5.22 ***Відособлена опора***

Бункер має відособлену опору в положені, коли він підтримуєтся за допомогою локального кронштейна або колони з обмеженою кількістю вузьких стійок, розташованих по колу бункера. Зазвичай використовуються чотири або шість відособлених опор, але зустрічаються і бункери з трьома і більш ніж шістьма опорами.

1.5.22 ***Discrete support***

A discrete support is a position in which a silo is supported using a local bracket or column, giving a limited number of narrow supports around the silo circumference. Four or six discrete supports are commonly used, but three or more than six are also found.

1.5.23 ***Пірамідальний хопер***

Пірамідальний хопер застосовується в якості воронкоподібної секції прямокутного бункеру у вигляді перевернутої піраміди. У цьому стандарті передбачається, що його геометрія проста і складається тільки з чотирьох плоских елементів трапецієвидної форми.

1.5.23 ***Pyramidal hopper***

A pyramidal hopper is used for the hopper section of a rectangular silo, in the form of an inverted pyramid. In this Standard, it is assumed that the geometry is simple, consisting of only four planar elements of trapezoidal shape.

1.6 Позначення використані у розділі 4

Використані позначення засновані на ISO 3898: 1987.

1.6 Symbols used in Part 4.1 of Eurocode 3

The symbols used are based on ISO 3898: 1987.

1.6.1 Прописні букви латинського алфавіту

A площа поперечного перерізу;
C мембранна міцність на розтяг;
C коефіцієнт повздовжнього вигину;
D жорсткість на згин;
E модуль Юнга;
F сила;
G модуль зсуву;
H висота конструкції;
I момент інерції площі поперечного перерізу;
I_t уніфікована постійна кручення;
K згинна жорсткість стінної панелі;
L висота сегменту оболонки або ребра жорсткості;
M згинаючий момент;
N осьова сила;
Q рівень допуску на виготовлення конструкції оболонки, сприйнятливої до повздовжнього вигину;
R_φ локальний радіус на гребені або в западині гофра жорсткості.

1.6.2 Рядкові букви латинського алфавіту

a коефіцієнт;
b ширина листа або ребра жорсткості;
d відстань між гребенями жорсткості гофра;
e ексцентриситет сили або ребра жорсткості;
f_y межа текучості сталі;
f_u межа міцності сталі;
h розліт полиць кільцевої балки;
j коефіцієнт міцності зварних з'єднань внахлест, визначений за допомогою мембранного напруження;
j еквівалентна гармоніка варіації розрахункового напруження;
l корисна довжина оболонки в режимі аналізу лінійного (одновісного) напруження;
l довжина хвилі гофра хвилястої листової сталі;

1.6.1 Roman upper case letters

A area of cross-section;
C membrane stretching stiffness;
C buckling coefficient;
D bending flexural rigidity;
E Young‟s modulus;
F force;
G shear modulus;
H height of structure;
I second moment of area of cross-section;
I_t uniform torsion constant;
K flexural stiffness of wall panel;
L height of shell segment or stiffener;
M bending moment;
N axial force;
Q fabrication tolerance quality of construction of a shell susceptible to buckling;
R_φ local radius at the crest or trough of a corrugation.

1.6.2 Roman lower case letters

a coefficient;
b width of plate or stiffener;
d crest to crest dimension of a corrugation;
e eccentricity of force or stiffener;
f_y yield strength of steel;
f_u ultimate strength of steel;
h separation of flanges of ring girder;
j joint efficiency factor for welded lap joints assessed using membrane stresses;
j equivalent harmonic of the design stress variation;
l effective length of shell in linear stress analysis;
l wavelength of a corrugation in corrugated sheeting;

l половина довжини хвилі вірогідного вигину (при розрахунках враховується висота);

l half wavelength of a potential buckle (height to be considered in calculation);

m згинаючий момент на одиницю ширини;

m bending moment per unit width;

m_x меридіальний згинаючий момент на одиницю кола;

m_x meridional bending moment per unit circumference;

m_y згинаючий момент в кільцевому напрямі на одиницю висоти короба;

m_y circumferential bending moment per unit height of box;

m_θ згинаючий момент в кільцевому напрямі на одиницю висоти оболонки;

m_θ circumferential bending moment per unit height of shell;

m_{xy} поперечний крутильний момент на одиницю ширини листа;

m_{xy} twisting shear moment per unit width of plate;

$m_{x\theta}$ поперечний крутильний момент, на одиницю ширини оболонки;

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

n результуюче мембранне напруження;

n membrane stress resultant;

n кількість відособлених опор уздовж кола бункера;

n number of discrete supports around silo circumference;

n_x результуюче меридіальне мембранне напруження на одиницю довжини кола;

n_x meridional membrane stress resultant per unit circumference;

n_y результуюче мембранне напруження в кільцевому напрямі на одиницю висоти короба;

n_y circumferential membrane stress resultant per unit height of box;

n_θ результуюче мембранне напруження в кільцевому напрямі на одиницю висоти оболонки;

n_θ circumferential membrane stress resultant per unit height of shell;

n_{xy} результуюче мембранне напруження зсуву на одиницю ширини листа;

n_{xy} membrane shear stress resultant per unit width of plate;

$n_{x\theta}$ результуюче мембранне напруження зсуву на одиницю ширини оболонки;

$n_{x\theta}$ membrane shear stress resultant per unit width of shell;

p навантаження розподіленим тиском;

p pressure distributed loading;

p_n нормальний тиск на оболонку (спрямований назовні);

p_n pressure normal to shell (outward);

p_x меридіальне поверхневе навантаження паралельне оболонці (спрямоване донизу);

p_x meridional surface loading parallel to shell (downward);

p_θ поверхневе навантаження паралельне оболонці в кільцевому напрямі (проти годинникової стрілки);

p_θ circumferential surface loading parallel to shell (anticlockwise in plan);

q поперечне зусилля зсуву на одиницю довжини, діюче на стягнення;

q transverse force per unit length acting on a tie;

r радіальна координата бункера круглої конфігурації;

r radial coordinate in a circular planform silo;

r радіус серединної поверхні

r radius of shell middle surface;

оболонки;

s крок ребер жорсткості в окружному напрямі;

t товщина стінки;

t_x, t_y еквівалентна товщина стінки гофрованого листа при розтягу в напрямах *x, y*;

w діапазон дефектності;

w радіальне відхилення;

x локальна меридіальна координата;

y локальна окружна координата;

z глобальна координата по вісі;

z координата уздовж вертикальної осі вісесиметричного бункера (оболонка обертання)

1.6.3 ***Букви грецького алфавіту***

$\mu\alpha$ коефіцієнт пружної втрати стійкості внаслідок дефектності (коефіцієнт руйнування);

α коефіцієнт температурного розширення;

β половина кута при вершині хопера;

γ_F частковий коефіцієнт для навантажень;

γ_M частковий коефіцієнт для опору;

δ граничний прогин;

Δ приріст;

χ коефіцієнт зменшення повздовжнього вигину колони;

χ коефіцієнт зменшення критичного напруження оболонки при повздовжньму вигині;

λ довжина півхвилі меридіального вигину оболонки;

$\bar{\lambda}$ відносне зменшення довжини оболонки;

μ коефіцієнт тертя об стінки;

ν коефіцієнт Пуассона;

θ окружна координата відносно оболонки;

σ нормальне напруження;

σ_{bx} меридіальне напруження при вигині;

σ_{by} кільцеве згинне напруження в коробі;

s circumferential separation of stiffeners;

t wall thickness;

t_x, t_y equivalent wall thickness of corrugated sheet for stretching in the *x, y* directions;

w imperfection amplitude;

w radial deflection;

x local meridional coordinate;

y local circumferential coordinate;

z global axial coordinate;

z coordinate along the vertical axis of an axisymmetric silo (shell of revolution).

1.6.3 ***Greek letters***

α elastic buckling imperfection factor (knock-down factor);

α coefficient of thermal expansion;

β hopper apex half angle;

γ_F partial factor for actions;

γ_M partial factor for resistance;

δ limiting deflection;

Δ increment;

χ reduction factor for flexural column buckling;

χ shell buckling stress reduction factor;

λ shell meridional bending half-wavelength;

$\bar{\lambda}$ relative slenderness of a shell;

μ wall friction coefficient;

ν Poisson‟s ratio;

θ circumferential coordinate around shell;

σ direct stress;

σ_{bx} meridional bending stress;

σ_{by} circumferential bending stress in box;

σ_{by} кільцеве згинне напруження в зігнутій оболонці;

σ_{by} circumferential bending stress in curved shell;

τ_{bxy} напруження зсуву при крученні в коробі;

τ_{bxy} twisting shear stress in box;

$\tau_{bx\theta}$ напруження зсуву при крученні в зігнутій оболонці;

$\tau_{bx\theta}$ twisting shear stress in curved shell;

σ_{mx} меридіальне мембранне напруження;

σ_{mx} meridional membrane stress;

σ_{my} кільцеве мембранне напруження в коробі;

σ_{my} circumferential membrane stress in box;

$\sigma_{m\theta}$ кільцеве мембранне напруження в зігнутій оболонці;

$\sigma_{m\theta}$ circumferential membrane stress in curved shell;

τ_{mxy} мембранне напруження зсуву в коробі;

τ_{mxy} membrane shear stress in box;

$\tau_{mx\theta}$ мембранне напруження зсуву в зігнутій оболонці;

$\tau_{mx\theta}$ membrane shear stress in curved shell;

σ_{sox} меридіальне напруження на зовнішній поверхні;

σ_{sox} meridional outer surface stress;

σ_{soy} кільцеве напруження на зовнішній поверхні короба;

σ_{soy} circumferential outer surface stress in box;

$\sigma_{so\theta}$ кільцеве напруження на зовнішній поверхні зігнутої оболонки;

$\sigma_{so\theta}$ circumferential outer surface stress in curved shell;

τ_{soxy} напруження зсуву на зовнішній поверхні короба;

τ_{soxy} outer surface shear stress in box;

$\tau_{sox\theta}$ напруження зсуву на зовнішній поверхні зігнутої оболонки;

$\tau_{sox\theta}$ outer surface shear stress in curved shell;

τ напруження зсуву;

τ shear stress;

ω безрозмірний параметр в розрахунках вигину;

ω dimensionless parameter in buckling calculation;

ω нахил до вертикалі хопера, вісь якого не вертикальна;

ω inclination to vertical of a hopper whose axis is not vertical;

ψ параметр нерівномірності напруження.

ψ stress non-uniformity parameter.

1.6.4 ***Нижні індекси***

E величина напруження або зміщення (що виникли при проектуванні);

E value of stress or displacement (arising from design actions);

F дії;

F actions;

M матеріал;

M material;

R опір;

R resistance;

S величина результуючого напруження (що виникло при проектуванні);

S value of stress resultant (arising from design actions);

b вигин;

b bending;

c циліндр;

c cylinder;

cr	критична величина повздовжнього вигину;
d	проектне значення;
eff	розрахункове значення;
h	хопер;
m	мембрана, середня точка прогону;
min	мінімальне допустиме значення;
n	нормаль відносно стінки;
p	тиск;
r	радіальна орієнтація;
s	юбка, опора;
s	поверхневе напруження (*з*… зовнішньої поверхні, *в*… внутрішньої поверхні)
u	критичне значення;
w	меридіальне паралельне відносно стінки (тертя об стінку);
x	меридіальний напрям;
y	окружний напрям (конструкцій короба), текучість;
z	вісьовий напрям;
θ	округлість (оболонок обертання).

1.7 Умовні позначення

1.7.1 *Умовні позначення в загальній системі вісей координат* для циліндричної конструкції бункера

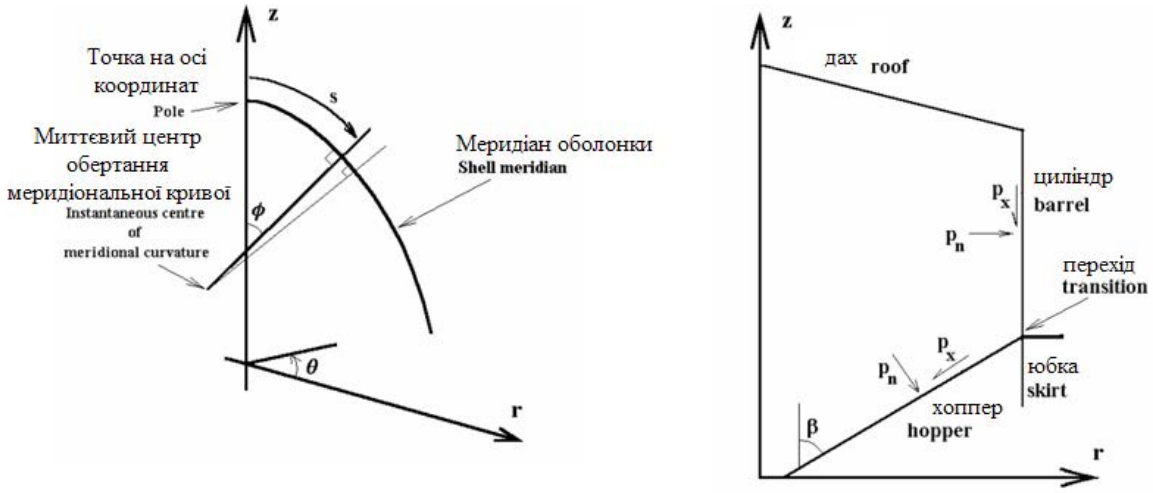
(1) Приведені тут умовні позначення призначені для повної конструкції бункера; вони передбачають, що бункер не є лише елементом будівельної конструкції.

cr	critical buckling value;
d	design value;
eff	effective;
h	hopper;
m	membrane, midspan;
min	minimum allowed value;
n	normal to the wall;
p	pressure;
r	radial;
s	skirt, support;
s	surface stress (o… outer surface, i… inner surface)
u	ultimate;
w	meridionally parallel to the wall (wall friction);
x	meridional;
y	circumferential (box structures), yield;
z	axial direction;
θ	circumferential (shells of revolution).

1.7 Sign conventions

1.7.1 *Conventions for global silo structure axis system for circular silos*

(1) The sign convention given here is for the complete silo structure, and recognises that the silo is not a structural member.



а) загальна система координат секції що завантажується;
a) general coordinate system

б) сукупні координати оболонки бункера

b) silo shell coordinates and loading: section

Рисунок 1.2 Системи координат кругового бункера

Figure 1.2 Coordinate systems for a circular silo

(2) Як правило, в якості загальної системи вісей координат конструкції бункера (див. рисунок 1.2) використовуються циліндрична система координат з наступними умовними позначеннями:

(2) In general, the convention for the global silo structure axis system is in cylindrical coordinates (see figure 1.2) as follows:

Система координат
координата уздовж центральної осі оболонки обертання z;
радіальна координата r;
окружна координата θ.

Coordinate system
Coordinate along the central axis of a shell of revolution z
Radial coordinate r
Circumferential coordinate θ

(3) Умовні позначення в позитивному напрямі:
Позитивний напрям назовні (позитивний внутрішній тиск, позитивне зміщення назовні). Позитивне напруження при розтягу (за винятком у повздовжньому вигині, коли деформація стиску має позитивне значення).

(3) The convention for positive directions is:
Outward direction positive (internal pressure positive, outward displacements positive) Tensile stresses positive (except in buckling expressions where compression is positive).

(4) Умовні позначення розподілених дій на поверхні стінки бункера:
нормальний тиск на оболонку (позитивне в випуклому напрямі) p_n;
меридіальне поверхневе навантаження паралельно координаті оболонки (позитивна спадаюча) p_x;
кільцеве поверхневе навантаження пара-

(4) The convention for distributed actions on the silo wall surface is:
Pressure normal to shell (outward positive) p_n
Meridional surface loading parallel to shell (downward positive) p_x
Circumferential surface loading parallel to

лельно кільцевій координаті оболонки (позитивна в напрямі проти годинникової стрілки p_θ.

shell (anticlockwise positive in plan) p_θ

1.7.2 ***Умовні позначення в загальній системі вісей координат для прямокутної конструкції бункера***

(1) Приведені тут умовні позначення призначені для повної конструкції бункера; вони передбачають, що бункер не є лише елементом будівельної конструкції.

1.7.2 ***Conventions for global silo structure axis system for rectangular silos***

(1) The sign convention given here is for the complete silo structure, and recognises that the silo is not a structural member.

(2) Як правило, в загальній системі осей координат конструкції бункера використовується прямокутна декартова система координат x, y, z, де вертикальний напрям позначений буквою z; див рисунок 1.3.

(2) In general, the convention for the global silo structure axis system is in Cartesian coordinates x, y, z, where the vertical direction is taken as z, see figure 1.3.

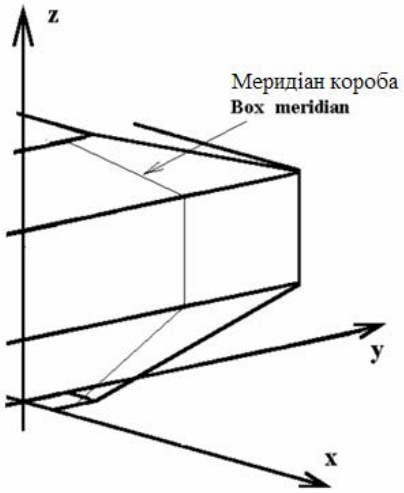
(3) Умовні позначення в позитивному напрямі:
Позитивний напрям назовні (позитивний внутрішній тиск, позитивне зміщення назовні в напрямі випуклості).
Позитивне напруження при розтязі (за винятком положень повздовжніх вигину, коли деформація стиску має позитивне значення).

(3) The convention for positive directions is:
Outward direction positive (internal pressure positive, outward displacements positive).

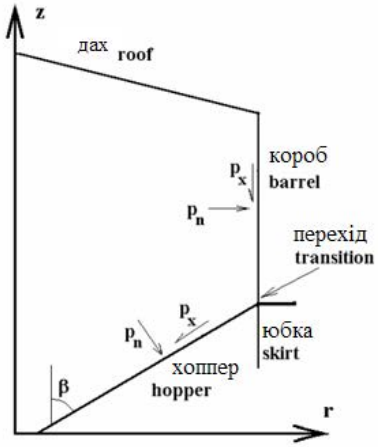
Tensile stresses positive (except in buckling expressions where compression is positive).

(4) Умовні позначення розподілених дій на поверхню стінки бункера:
нормальний тиск на короб (позитивне в зовнішньому напрямі) p_n;
меридіальне поверхневе навантаження паралельно поверхні короба (позитивна спадаюча) p_x;
кільцеве поверхневе навантаження у площині поперечного перерізу короба (позитивна в напрямі проти годинникової стрілки p_y.

(4) The convention for distributed actions on the silo wall surface is:
Pressure normal to box (outward positive p_n
Meridional surface loading parallel to box surface (downward positive) p_x
Circumferential surface loading in the plane of the box plan cross-section (anticlockwise positive) p_y



а) загальна система координат секції що завантажується;
a) general coordinate system



б) координати коробчатого бункера
b) silo box coordinates and loading: section

Рисунок 1.3 Системи координат прямокутного бункера
Figure 1.3 Coordinate systems for a rectangular silo

1.7.2 *Умовні позначення вісей конструктивних елементів у бункерах, що мають циліндричну чи прямокутну конфігурацію*

(1) Умовні позначення конструктивних елементів, закріплених на стінці бункера (див рисунки 1.4 і 1.5). Вони різні для меридіальних і кругових елементів.

(2) Умовне позначення прямих меридіальних конструктивних елементів (див. рисунок 1.4а), закріплених на стінках бункера (оболонкового або коробчатого):
меридіальна координата циліндра (короба), хопера і даху *x*;
вісь сильного вигину (паралельно полицям: вісь меридіального вигину) *y*;
вісь слабкого вигину (перпендикулярно полицям) z.

Примітка: Меридіальне ребро жорсткості згинається таким чином, що поєднується з меридіональним згином (m_x) в циліндрах відносно осі *y* ребра жорсткості.

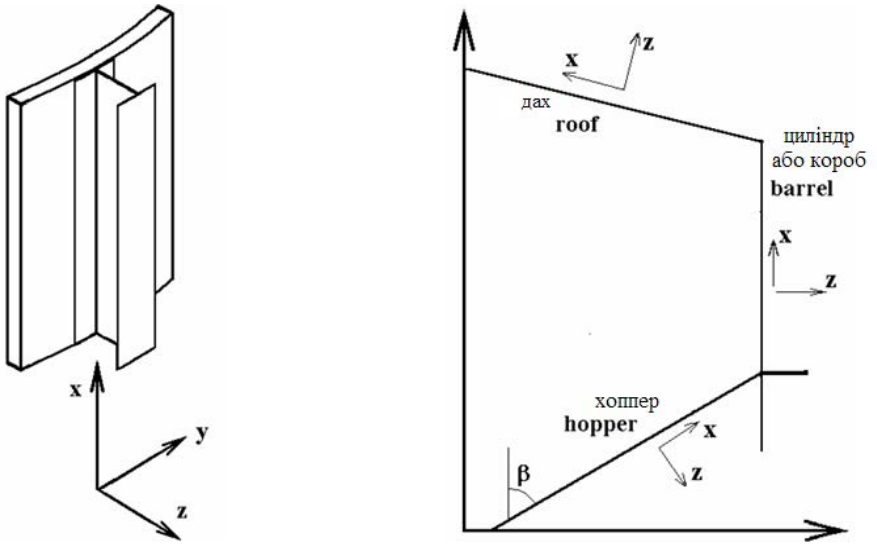
1.7.3 *Conventions for structural element axes in both circular and rectangular silos*

(1) The convention for structural elements attached to the silo wall (see figures 1.4 and 1.5) is different for meridional and circumferential members.

(2) The convention for meridional straight structural elements (see figure 1.4a) attached to the silo wall (shells and boxes) 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*

NOTE: A meridional stiffener bending in a manner that is compatible with meridional bending (m_x) in the cylinder bends about the *y* axis of the stiffener.

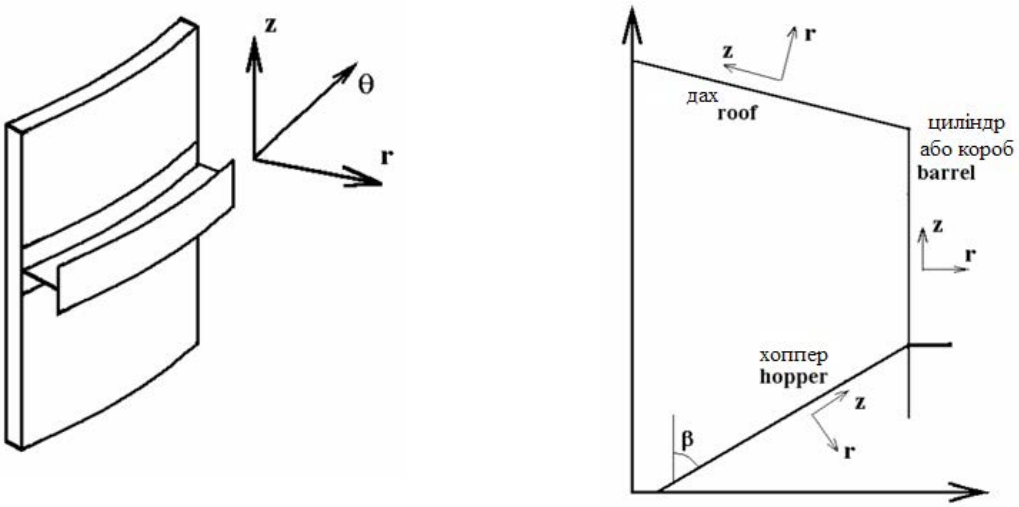


а) ребро жорсткості і вісь вигину
a) stiffener and axes of bending

б) локальні осі різних сегментів
b) local axes in different segments

Рисунок 1.4 Локальні системи координат меридіальних ребер жорсткості на оболонці або коробі

Figure 1.4 Coordinate systems for a rectangular silo



а) ребро жорсткості і вісь вигину;
a) stiffener and axes of bending

б) локальні осі різних сегментів
b) local axes in different segments

Рисунок1.5 Локальні системи координат окружних ребер жорсткості на оболонці або коробі

Figure1.5 Local coordinate systems for circumferential stiffeners on a shell or box

(3) Умовні позначення зігнутих окружних конструктивних елементів (див. рисунок 1.5а), закріплених на стінці оболонки:
окружна вісь координат (крива) θ;
радіальна вісь (вісь вигину у вертикальній площині) r;
вертикальна вісь(вісь окружного вигину) z.

(3) The convention for circumferential curved structural elements (see figure 1.5a) attached to a shell wall is:

Circumferential coordinate axis (curved) θ
Radial axis (axis for bending in the vertical plane) r
Vertical axis (axis for circumferential bending) z

Примітка: Кільцеве ребро жорсткості або кільце має бути зігнуте відносно своєї вертикальної осі z, якщо згин сумісний з окружним згином циліндра (m_0). Воно схильне до згинаючих моментів відносно своєї радіальної осі r, якщо виступає кільцевою балкою, або якщо знаходиться під впливом радіальних сил в позацентровій точці центру тяжіння кільця.

NOTE: A circumferential stiffener or ring is subject to bending about its vertical axis z when the bending is compatible with circumferential bending in the cylinder (m_0). It is subject to bending moments about its radial axis r when either acting as a ring girder, or when subject to radial forces acting at a point eccentric to the ring centroid.

(4) Умовне позначення прямих кільцевих конструктивних елементів, які кріпляться на коробі :

Окружна вісь x;
Горизонтальна вісь y;
Вертикальна вісь z.

(4) The convention for circumferential straight structural elements attached to a box is:

Circumferential axis x
Horizontal axis y
Vertical axis z

Примітка: Пряме кільцеве ребро жорсткості на коробі має бути зігнуте відносно своєї вертикальной осі z, якщо в нормальних умовах згин знаходиться поза площиною стінки короба.

NOTE: A circumferential straight stiffener on a box is subject to bending about its vertical axis z when the bending is out of the plane of the box wall, which is the normal condition.

1.7.4 *Умовні позначення результуючих напружень для циліндричних бункерів і прямокутних бункерів*

(1) Умовні позначення нижніх індексів, що вказують на мембранні сили:
"Нижній індекс виводиться з напряму, в якому ця сила викликає нормальне напруження"
Результуюче мембранне напруження:

n_x результуюче меридіальне мембранне напруження;
n_θ результуюче кільцеве мембранне напруження в оболонках;
n_y результуюче кільцеве мембранне напруження в коробах;
n_{xy} або $n_{x\theta}$ результуюче мембранне напруження зсуву.

Мембранне напруження:

σ_{mx} меридіальне мембранне напруження;
$\sigma_{m\theta}$ кільцеве мембранне напруження в оболонках;
σ_{my} кільцеве мембранне напруження в прямокутних коробах;
τ_{mxy} або $\tau_{mx\theta}$ мембранне напруження зсуву.

1.7.4 *Conventions for stress resultants for circular silos and rectangular silos*

(1) The convention used for subscripts indicating membrane forces is:
"The subscript derives from the direction in which direct stress is induced by the force"

Membrane stress resultants:

n_x meridional membrane stress resultant
n_θ circumferential membrane stress resultant in shells
n_y circumferential membrane stress resultant in rectangular boxes
n_{xy} or $n_{x\theta}$ membrane shear stress resultant

Membrane stresses:

σ_{mx} meridional membrane stress
$\sigma_{m\theta}$ circumferential membrane stress in shells
σ_{my} circumferential membrane stress in rectangular boxes
τ_{mxy} or $\tau_{mx\theta}$ membrane shear stress

(2) Умовні позначення, вживані в нижніх індексах, що вказують на моменти:
"Нижній індекс виводиться з напряму, в якому цей момент викликає нормальне напруження".

Примітка: Це умовне позначення оболонки і листа відрізняється від позначення балок і колон у частинах 1.1 і 1.3 Еврокода 3. Коли разом з цими правилами застосовуються частини 1.1 та 1.3, необхідно проявляти обережність.

Результуюче напруження вигину:
m_x меридіальний згинаючий момент на одиницю ширини;
m_θ кільцевий згинаючий момент на одиницю ширини в оболонках;
m_y результуюче кільцеве напруження вигину в прямокутних коробах;
m_{xy} або $m_{x\theta}$ крутильний момент зсуву, на одиницю ширини.
Напруження вигину:
σ_{bx} меридіальне напруження вигину;
$\sigma_{b\theta}$ кільцеве напруження вигину в оболонках;
σ_{by} кільцеве напруження вигину в прямокутних коробах;
τ_{bxy} або $\tau_{bx\theta}$ крутне напруження зсуву.
Напруження на внутрішніх і зовнішніх поверхонях:
σ_{six}, σ_{sox} меридіальне внутрішнє, зовнішнє поверхневе напруження в коробах і оболонках;
$\sigma_{si\theta}$, $\sigma_{so\theta}$ кільцеве внутрішнє, зовнішнє поверхневе напруження в оболонках;
$\tau_{six\theta}$, $\tau_{sox\theta}$ $\tau_{sox\theta}$ внутрішнє, зовнішнє поверхневе напруження зсуву в оболонках;
σ_{siy}, σ_{soy} кільцеве внутрішнє, зовнішнє поверхневе напруження в прямокутних коробах;

(2) The convention used for subscripts indicating moments is:

"The subscript derives from the direction in which direct stress is induced by the moment".

NOTE: This plate and shell convention differs from that for beams and columns as used in Eurocode 3 Parts 1.1 and 1.3. Care must be exercised when using Parts 1.1 and 1.3 in conjunction with these rules.

Bending stress resultants:
m_x meridional bending moment per unit width
m_θ circumferential bending moment per unit width in shells
m_y circumferential bending stress resultant in rectangular boxes
m_{xy} or $m_{x\theta}$ twisting shear moment per unit width
Bending stresses:
σ_{bx} meridional bending stress
$\sigma_{b\theta}$ circumferential bending stress in shells

σ_{by} circumferential bending stress in rectangular boxes
τ_{bxy} or $\tau_{bx\theta}$ twisting shear stress
Inner and outer surface stresses:

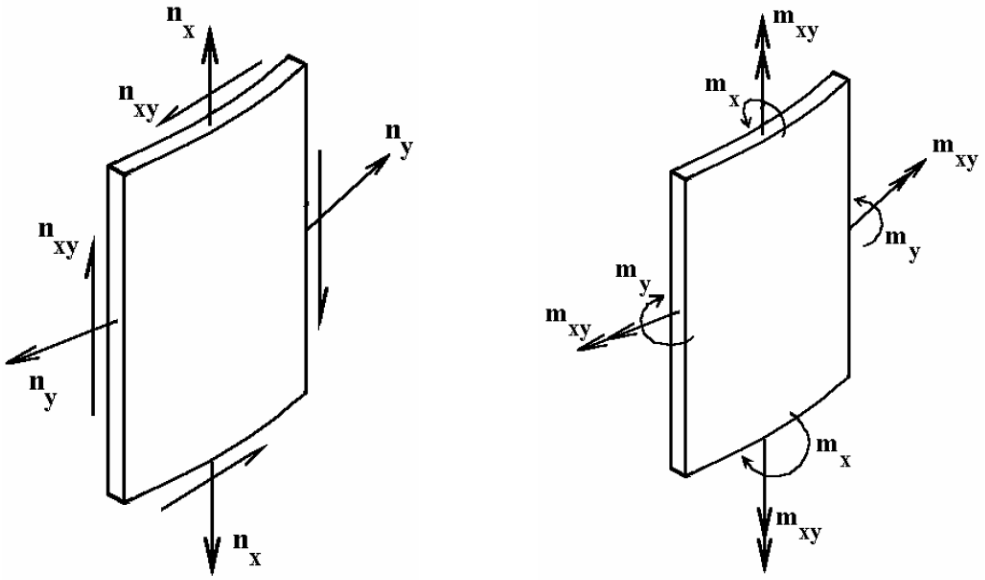
σ_{six}, σ_{sox} meridional inner, outer surface stress for boxes and shells
$\sigma_{si\theta}$, $\sigma_{so\theta}$ circumferential inner, outer surface stress in shells

$\tau_{six\theta}$, $\tau_{sox\theta}$ inner, outer surface shear stress in shells

σ_{siy}, σ_{soy} circumferential inner, outer surface stress in rectangular boxes

τ_{sixy} , τ_{soxy} внутрішнє, зовнішнє поверхневе напруження зсуву в прямокутних коробах.

τ_{sixy} , τ_{soxy} inner, outer surface shear stress in rectangular boxes



а) Результуюче мембранне напруження;
a) Membrane stress resultants

б) Результуюче напруження вигину
b) Bending stress resultants

Рисунок 1.6 Результуюче напруження в стінках бункера (в оболонках і коробах)
Figure 1.6 Stress resultants in the silo wall (shells and boxes)

1.8 Одиниці виміру

(1)P Одиниці виміру системи СІ повинні застосовуватися відповідно до стандарту ISO 1000.

1.8 Units

(1)P S.I. units shall be used in accordance with ISO 1000.

Габарити і товщина	м	мм
dimensions and thicknesses	m	mm
питома вага	кН/м^3	Н/мм^3
unit weight	kN/m^3	N/mm^3
зусилля і навантаження	кН	Н
forces and loads	kN	N
лінійні сили і лінійні навантаження	кН/м	Н/мм
line forces and line loads	kN/m	N/mm
тиск і площа розподілених дій	кПа	Мпа
pressures and area distributed actions	kPa	Mpa
одинична маса	кг/м^3	кг/мм^3
unit mass	kg/m^3	kg/mm^3
прискорення	км/с^2	м/с^2
acceleration	km/s^2	m/s^2
результуюче мембранного напруження	кН/м	Н/мм
membrane stress resultants	kN/m	N/mm
результуюче згинаючого напруження	кНм/м	Нмм/мм
bending stress resultants	kNm/m	Nmm/mm
напруження і модулі пружності	кПа	Мпа (=Н/мм^2)
stresses and elastic moduli	kPa	Mpa (=N/mm^2)

2 ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Вимоги

(1) Бункер повинен проектуватися, будуватися і обслуговуватися відповідно до вимог розділу 2 EN 1990 і з урахуванням нижченаведених доповнень.

(2) Конструкція бункера повинна включати усі будівельні секції з оболонками і зварними листовими елементами, а також ребрами жорсткості, розпірками, кільцями і оснащенням.

(3) Несуча конструкція не повинна розглядатися як частина конструкції бункера. Межу між бункером і його несучими опорами слід сприймати, як показано на рисунку 1.1. Аналогічно, початком інших конструкцій, які підтримуються бункером, слід приймати точки, де закінчуються стінка бункера і його оснащення.

(4) При необхідності проект бункерів повинен передбачати їх захист від ушкоджень з урахуванням умов експлуатації бункера.

(5) Спеціальні вимоги для особливих прикладних цілей можуть бути погоджені по домовленості між проектною організацією, замовником і відповідним наглядовим органом.

2.2 Розмежування надійності

(1) Питання розмежування надійності див. EN 1990.

Примітка: Національний додаток може містити визначення класів наслідків бункерів з урахуванням функціональних ознак: місця розташування, способів заповнення і завантаження, конструктивного типу, розміру і технології експлуатації.

(2) Проекти бункерів повинні передбачати різні рівні їх жорсткості залежно від вибраного класу, конструктивних рішень,

2 BASIS OF DESIGN

2.1 Requirements

(1) A silo shall be designed, constructed and maintained to meet the requirements of section 2 of EN 1990 as supplemented by the following.

(2) The silo structure should include all shell and plated sections of the structure, including stiffeners, ribs, rings and attachments.

(3) The supporting structure should not be treated as part of the silo structure. The boundary between the silo and its supports should be taken as indicated in figure 1.1. Similarly, other structures supported by the silo should be treated as beginning where the silo wall or attachment ends.

(4) Silos should be designed to be damage-tolerant where appropriate, considering the use of the silo.

(5) Particular requirements for special applications may be agreed between the designer, the client and the relevant authority.

2.2 Reliability differentiation

(1) For reliability differentiation, see EN 1990.

NOTE: The national annex may define consequence classes for silos as a function of the location, type of infill and loading, the structural type, size and type of operation.

(2) Different levels of rigour should be used in the design of silo structures, depending on the consequence class chosen, the structural

і сприйнятливості до різних станів відмови.

(3) В даному стандарті розглядаються вимоги до проектів трьох класів наслідків бункерів, з однаковим рівнем ризику при оцінці проекту і витрат які враховують дії, необхідні для зменшення ризику відмови різних конструкцій. Це бункери класів наслідків 1, 2 і 3.

Примітка 1: Інформація про класифікацію бункерів може міститися в Національному додатку. У таблиці 2.1 наведений приклад класифікації за двома параметрами: розміром і методом експлуатації. Усі інші параметри виводяться на підставі середніх показників; див. В. 3.1 стандарту EN 1990.

arrangement and the susceptibility to different failure modes.

(3) For this standard, 3 consequence classes are used, with requirements which produce designs with essentially equal risk in the design assessment and considering the expense and procedures necessary to reduce the risk of failure for different structures: Consequence Classes 1, 2 and 3.

NOTE 1: The national annex may provide information one the consequence classes. Table 2.1 gives an example for the classification of two parameters, the size and the type of operation into consequence classes when all other parameters result in medium consequences, see EN 1990, B.3.1.

Таблиця 2.1 – Класи наслідків з урахуванням розміру бункера і методу експлуатації

Table 2.1 – Consequence classes depending on size and operation

Клас наслідків Consequence Class	Умови проектування Design situations
Клас наслідків 3 Consequence Class 3	Бункери з наземними опорами або бункери, що спираються на суцільну юбку до рівня землі і що мають місткість більше W_{3a} тонн Ground supported silos or silos supported on a complete skirt extending to the ground with capacity in excess of W_{3a} tonnes Бункери на відокремлених опорах місткістю більше W_{3b} тонн Discretely supported silos with capacity in excess of W_{3b} tonnes Бункери місткістю більше W_{3c} тонн, в яких є будь-яка з наступних умов проектування : Silos with capacity in excess of W_{3c} tonnes in which any of the following design situations occur: а) нецентроване навантаження a) eccentric discharge б) локалізація навантаження на окремих ділянках b) local patch loading c) асиметричне наповнення c) unsymmetrical filling
Клас наслідків 2 Consequence Class 2	Усі бункери, охоплені цим стандартом і не включені в інший клас All silos covered by this Standard and not placed in another class
Клас наслідків 1 Consequence Class 1	Бункери місткістю від W_{1a} тонн† до W_{1b} тонн Silos with capacity between W_{1a} tonnes† and W_{1b} tonnes
† Бункери місткістю менш W_{1a} тонн не підпадають під вимоги данного стандарту. † Silos with capacity less than W_{1a} tonnes are not covered by this standard.	

Рекомендовані значення для розмежування класів :
The recommended values for class boundaries are as follows:

Межа класу Class boundary	Рекомендоване значення (у тоннах) Recommended value (tonnes)
W_{3a}	5000
W_{3b}	1000
W_{3c}	200
W_{1b}	100
W_{1a}	10

Примітка 2: Класифікацію з урахуванням оцінки типів дії див. в стандарті EN 1991-4.

NOTE 2: For the classification into action assessment classes, see EN 1991-4

(4) Завжди може бути прийнятий вищий клас наслідків, ніж той, який потрібно.

(4) A higher Consequence Class may always be adopted than that required.

(5) Вибір відповідного класу наслідків має бути спільно погоджений проектною організацією, замовником і відповідним наглядовим органом.

(5) The choice of relevant Consequence Class shall be agreed between the designer, the client and the relevant authority.

(6) Клас наслідків 3 слід застосовувати в проектах для локалізації навантаження на окремих ділянках. Це відноситься до завантаження на зберігання твердих матеріалів, яке викликає навантаження на окремі ділянки, що поширюється на менш ніж на половину кола бункера, як визначено в стандарті EN 1991-4.

(6) Consequence Class 3 should be used for local patch loading, which refers to a stored solids loading case causing a patch load which extends round less than half the circumference of the silo, as defined in EN 1991-4.

(7) Для класу наслідків 1 можуть бути прийняті спрощені положення.

(7) For Consequence Class 1, simplified provisions may be adopted.

Примітка: Відповідні положення для бункерів класу наслідків 1 викладені в додатку А.

NOTE: Appropriate provisions for silos in Consequence Class 1 are set out in Annex A.

2.3 Граничні стани

2.3 Limit states

(1) Стосовно данної частини слід прийняти граничні стани, визначені у стандарті EN 1993-1-6.

(1) The limit states defined in EN 1993-1-6 should be adopted for this Part.

2.4 Впливи і екологічні наслідки

2.4.1 ***Загальні вимоги***

(1) Повинні виконуватися загальні вимоги, викладені в розділі 4 стандарту EN 1990.

2.4.2 ***Навантаження вітру***

(1) В цілях конкретизації дій вітру, не вказаних в стандарті EN 1991-1-4 в якості умов проектування відокремлених бункерів або їх груп, необхідно погоджувати відповідну додаткову інформацію.

(2) Оскільки великі легкі конструкції чутливі навіть до невеликого перерозподілу вітрового тиску на стінку бункера, з точки зору опору повздовжньому вигину в порожньому стані і необхідності монтажу кріпильних деталей на фундаменті, додаткова інформація може використовуватися для поповнення основних даних про вітер, що містяться в стандарті EN 1991-1-4 для забезпечення конкретних потреб при експлуатації окремих будівельних конструкцій.

Примітка: Відповідна додаткова інформація про розподіл тиску вітру міститься в додатку С.

2.4.3 ***Комбінації тиску твердих матеріалів з іншими діями***

(1) Дії на бункери повинні враховувати окремі чинники, викладені в 2.9.2.

2.5 Властивості матеріалу

(1) Слід дотримуватися загальних вимог до властивостей матеріалів, заданних в EN 1993-1-1.

(2) Необхідно дотримуватися і особливих властивостей матеріалів для бункерів, викладених в розділі 3 цієї частини.

2.4 Actions and environmental effects

2.4.1 ***General***

(1)P The general requirements set out in section 4 of EN 1990 shall be satisfied.

2.4.2 ***Wind action***

(1) For specifications of wind actions not set down in EN 1991-1-4 for the design of silos in isolation and in groups, appropriate additional information should be agreed.

(2) Because these large light structures are sensitive to the detailed wind pressure distribution on the wall, both with respect to the buckling resistance when empty and the holding down details required at the foundation, additional information may be used to augment the basic wind data provided in EN 1991-1-4 for the specific needs of individual constructions.

NOTE: Appropriate additional information on wind pressure distributions is set out in Annex C.

2.4.3 ***Combination of solids pressures with other actions***

(1) The partial factors on actions in silos set out in 2.9.2 shall be used.

2.5 Material properties

(1) The general requirements for material properties set out in EN 1993-1-1 should be followed.

(2) The specific properties of materials for silos given in section 3 of this Part should be used.

2.6 Геометричні дані

(1) Слід керуватися положеннями про геометричні характеристики, що містяться у розділі 6 стандарту EN 1990.

(2) Також повинна використовуватися додаткова інформація характерна для оболонкових конструкцій, яка міститься в стандарті EN 1993-1-6.

(3) Товщину листа оболонки слід розглядати як номінальну товщину. У разі нанесення на сталевий лист металевого покриття зануренням в гарячу ванну згідно із стандартом EN 10147 номінальною товщиною слід вважати номінальну товщину основного металу, отриману в результаті віднімання з номінальної зовнішньої товщини загальної товщини цинкового покриття на обох поверхнях сталевого листа.

(4) Наслідки корозії і відповідне зменшення товщини стінних листів бункера повинні враховуватися при проектуванні відповідно до 4.1.4.

2.7 Моделювання бункера для визначення наслідків впливів

(1) Слід керуватися загальними вимогами, викладеними у розділі 7 стандарту EN 1990.

(2) З метою забезпечення експлуатаційної надійності необхідно виконувати спеціальні вимоги до структурного аналізу, викладені у розділах 4 - 9 цієї частини для кожного конструктивного елементу.

Також необхідно виконувати спеціальні вимоги до структурного аналізу в частині забезпечення крайніх граничних станів, передбачені у розділах 4 - 9 цієї частини і більш детально викладених в стандартах EN 1993-1-6 та EN 1993-1-7.

2.6 Geometrical data

(1) The provisions concerning geometrical data given in section 6 of EN 1990 shall be followed.

(2) The additional information specific to shell structures given in EN 1993-1-6 should also be applied.

(3) The shell plate thickness should be taken as the nominal thickness. In the case of hot-dipped metal coated steel sheet conforming with EN 10147, the nominal thickness should be taken as the nominal core thickness, obtained as the nominal external thickness less the total thickness of zinc coating on both surfaces.

(4) The effects of corrosion and abrasion on the thickness of silo wall plates should be included in the design, in accordance with 4.1.4.

2.7 Modelling of the silo for determining action effects

(1) The general requirements set out in section 7 of EN 1990 shall be followed.

(2) The specific requirements for structural analysis in relation to serviceability, set out in sections 4 to 9 of this Part for each structural segment, should be followed.

(3) The specific requirements for structural analysis in relation to ultimate limit states, set out in sections 4 to 9 of this Part and in more detail in EN 1993-1-6 and EN 1993-1-7, should be followed.

2.8 Проектування, що супроводжується тестуванням

(1) Слід керуватися загальними вимогами, вказаними у додатку D до EN 1990.

(2) До типових бункерів (заводського виготовлення), які підлягають всебічним випробуванням, може застосовуватися критерій обов'язкової відповідності, прийнятий в цілях проектування.

2.9 Наслідки дій Для перевірки граничного стану

2.9.1 ***Загальні вимоги***

(1) В цій частині повинні виконуватися загальні вимоги, вказані у розділі 9 EN 1990.

2.9.2 ***Часткові коефіцієнти для оцінки крайніх граничних станів***

2.9.2.1 *Часткові коефіцієнти дії на бункери*

(1) Для стійких, тимчасових і випадкових умов проектування часткові коефіцієнти γ_F можуть бути в стандартах EN 1990 та EN 1991-4.

(2) Часткові коефіцієнти для типових букерів (заводського виготовлення) можуть бути задані відповідними повноважними органами.

Примітка: Стосовно типових бункерів коефіцієнти, вказані в (1), служать тільки в якості направляючих. Вони представлені, щоб показати вірогідні рівні необхідні для досягнення послідовної сумісності з іншими проектами.

2.9.2.2 *Часткові коефіцієнти, що впливають на опірність*

(1) Якщо структурні властивості визначаються шляхом тестування, то повинні застосовуватися вимоги і процедури, передбачені в EN 1990.

2.8 Design assisted by testing

(1) The general requirements set out in Annex D of EN 1990 should be followed.

(2) For 'product type' silos (factory production), which are subject to full scale testing, 'deemed-to-satisfy' criteria may be adopted for design purposes.

2.9 Action effects for limit state verifications

2.9.1 ***General***

(1) The general requirements set out in section 9 of EN 1990 shall be satisfied.

2.9.2 ***Partial factors for ultimate limit states***

2.9.2.1 *Partial factors for actions on silos*

(1) For persistent, transient and accidental design situations, the partial factors γ_F shall be taken from EN 1990 and EN 1991-4.

(2) Partial factors for „product type" silos (factory production) may be specified by the appropriate authorities.

NOTE: When applied to „product type" silos, the factors in (1) are for guidance purposes only. They are provided to show the likely levels needed to achieve consistent reliability with other designs.

2.9.2.2 *Partial factors for resistances*

(1) Where structural properties are determined by testing, the requirements and procedures of EN 1990 should be adopted.

(2) Верифікація характеристик втоми повинна проводитися згідно розділу 9 EN 1993-1-6.

(2) Fatigue verifications should satisfy section 9 of EN 1993-1-6.

(3) Часткові коефіцієнти γ_{Mi} для різних граничних станів представлені в таблиці 2.2.

(3) The partial factors γ_{Mi} for different limit states shall be taken from table 2.2.

Таблиця 2.2 – Часткові коефіцієнти опірності
Table 2.2 – Partial factors for resistance

Опірність стану відмови Resistance to failure mode	Релевантний коефіцієнт γ Relevant γ
Опірність зварного або болтового з'єднання стінки оболонки стану межі пластичності Resistance of welded or bolted shell wall to plastic limit state	γ_{M0}
Опірність стінки оболонки стійкості Resistance of shell wall to stability	γ_{M1}
Опірність зварного або болтового з'єднання стінки оболонки розриву Resistance of welded or bolted shell wall to rupture	γ_{M2}
Опірність стінки оболонки циклічній пластичності Resistance of shell wall to cyclic plasticity	γ_{M4}
Опірність з'єднань Resistance of connections	γ_{M5}
Опірність стінки оболонки втомі Resistance of shell wall to fatigue	γ_{M6}

Примітка: Часткові коефіцієнти γ_{Mi} для бункерів можуть бути визначені в Національному додатку. Додаткова інформація про значення γ_{M5} знаходиться в стандарті EN 1993-1-8. Додаткова информація про значення γ_{M6} знаходиться в EN 1993-1-9. Для бункерів рекомендуються наступні числові значення:

NOTE: Partial factors γ_{Mi} for silos may be defined in the National Annex. For values of γ_{M5}, further information may be found in EN 1993-1-8. For values of γ_{M6}, further information may be found in EN 1993-1-9. The following numerical values are recommended for silos:

$\gamma_{M0} = 1{,}00$	$\gamma_{M1} = 1{,}10$	$\gamma_{M2} = 1{,}25$
$\gamma_{M4} = 1{,}00$	$\gamma_{M5} = 1{,}25$	$\gamma_{M6} = 1{,}10$

Для подальшої диференціації див. 2.2(1) і 2.2(3).

For further differentiation, see 2.2(1) and 2.2(3)

2.9.3 *Граничний стан придатності до експлуатації*

(1) Якщо відповідні положення про граничні стани придатності до експлуатації містять спрощені правила відповідності, необхідно виконати детальні розрахунки, використовуючи різні необхідні поєднання дій.

2.9.3 *Serviceability limit states*

(1) Where simplified compliance rules are given in the relevant provisions dealing with serviceability limit states, detailed calculations using combinations of actions need not be carried out.

2.10 Довговічність

(1) Слід виконати загальні вимоги, викладені в розділі 2.6 EN 1990.

2.11 Вогнестійкість

(1) В частині забезпечення вогнестійкості необхідно дотримуватися положень, встановлених в EN 1993-1-2.

2.10 Durability

(1) The general requirements set out in 2.6 of EN 1990 should be followed.

2.11 Fire resistance

(1) The provisions set out in EN 1993-1-2 for fire resistance should be met.

3 ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Загальні положення

(1) Усі марки сталі, що використовуються для бункерів, мають бути придатні для зварювання, щоб при необхідності забезпечити подальші модифікації.

(2) Усі марки сталі, що використовуються для бункерів циліндричної конфігурації, мають бути придатні для холодного формування в листи або елементи криволінійної форми.

(3) Властивості матеріалу, вказані в цьому розділі (див. таблицю 3.1 EN 1993-1-1 і таблицю 3.1b EN 1993-1-3), повинні розглядатися як номінальні значення, прийняті в проектних розрахунках як характеристичні значення.

(4) Інші властивості матеріалів приведені у відповідних еталонних стандартах, вказаних у стандарті EN 1993-1-1.

(5) Якщо бункер можна заповнювати гарячими твердими матеріалами, значення властивостей матеріалів мають бути відповідно понижені до значень, відповідних максимальним температурам, які зустрічаються на практиці.

(6) Якщо температура перевищує 100°C, властивості матеріалу повинні визначатися згідно з EN 13084-7.

3.2 Конструкційні сталі

(1) Методи проектування за допомогою розрахунків, що містяться в цій частині 4.1 EN 1993, можуть застосовуватися до конструкційних сталей згідно стандарту EN 1993-1-1, якщо вони відповідають європейським і міжнародним стандартам, перерахованим в таблиці 3.1.

(2) Механічні властивості конструкційних сталей згідно стандарту EN 10025 або EN 10149 визначаються відповідно до стандартів EN 1993-1-1, EN 1993-1-3 та

3 PROPERTIES OF MATERIALS

3.1 General

(1) All steels used for silos should be suitable for welding to permit later modifications when necessary.

(2) All steels used for silos of circular planform should be suitable for cold forming into curved sheets or curved members.

(3) The material properties given in this section, see Table 3.1 in EN 1993-1-1 and Table 3.1b in EN 1993-1-3, should be treated as nominal values to be adopted as characteristic values in design calculations.

(4) Other material properties are given in the relevant Reference Standards defined in EN 1993-1-1.

(5) Where the silo may be filled with hot solids, the values of the material properties should be appropriately reduced to values corresponding to the maximum temperatures to be encountered.

(6) Where the temperature exceeds 100°C, the material properties should be obtained from EN 13084-7.

3.2 Structural steels

(1) The methods for design by calculation given in this Part 4.1 of EN 1993 may be used for structural steels as defined in EN 1993-1-1, which conform with the European Standards and International Standards listed in table 3.1.

(2) The mechanical properties of structural steels, according to EN 10025 or EN 10149 should be obtained from EN 1993-1-1, EN 1993-1-3 and EN 1993-1-4.

EN 1993-1-4.

(3) Допуски на корозію і стирання приведені в розділі 4 частини 4.1.

(4) Передбачається, що властивості сталі при розтязі рівнозначні властивостям при стиску.

(5) Для сталей, що розглядаються в цій частині 4.1 стандарту EN 1993, проектне значення модуля пружності Юнга приймається як $E = 210000\,(\text{МПа})$, а коефіцієнт поперечної деформації Пуассона приймається як $\nu = 0,3$.

(3) Corrosion and abrasion allowances are given in section 4 of this Part 4.1.

(4) It should be assumed that the properties of steel in tension are the same as those in compression.

(5) For the steels covered by this Part 4.1 of EN 1993, the design value of the modulus of elasticity should be taken as $E = 210000\,\text{MPa}$ and Poisson"s ratio as $\nu = 0,3$.

3.3 Неіржавіючі сталІ

(1) Механічні властивості неіржавіючих сталей повинні відповідати стандарту EN 1993-1-4.

(2) Керівні напрями для вибору неіржавіючих сталей з урахуванням дії корозії і стиранні твердих матеріалів, що зберігаються, можна отримати з відповідних джерел.

(3) Якщо проект пов'язаний з розрахунками вигину, повинні застосовуватися відповідні зменшені показники властивостей (див. EN 1993-1-6).

3.3 Stainless steels

(1) The mechanical properties of stainless steels should be obtained from EN 1993-1-4.

(2) Guidance for the selection of stainless steels in view of corrosion and abrasion actions of stored solids may be obtained from appropriate sources.

(3) Where the design involves a buckling calculation, appropriate reduced properties should be used (see EN 1993-1-6).

3.4 Спеціальні леговані сталі

(1) Що стосується нестандартизованих легованих сталей, мають бути визначені знижені значення відповідних механічних властивостей.

Примітка: Інформація про відповідні значення може міститися в Національному додатку.

(2) Керівні напрями для вибору неіржавіючих сталей з урахуванням дії корозії і стиранні твердих матеріалів, що зберігаються, можна отримати з відповідних джерел.

(3) Якщо проект пов'язаний з розрахунками вигину, то повинні застосовуватися відповідні зменшені показники властивостей(див. EN 1993-1-6).

3.4 Special alloy steels

(1) For non-standardised alloy steels, appropriate values of relevant mechanical properties should be defined.

NOTE: The National Annex may give information on appropriate values.

(2) Guidance for the selection of non-standardised alloy steels with respect to the corrosion and abrasion actions of stored solids should be obtained from appropriate sources.

(3) Where the design involves a buckling calculation, appropriate reduced properties should be used (see EN 1993-1-6).

3.5 Вимоги до міцності

(1) Вимоги до міцності сталей визначаються у відповідності з EN 1993-1-10.

3.5 Toughness requirements

(1) The toughness requirements for the steels should be determined according to EN 1993-1-10.

4 ОСНОВА СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ

4.1 Крайні граничні стани

4.1.1 *Основа*

(1) Склад сталевих конструкцій і комплектуючих повинен задовольняти основним проектним вимогам, вказаним в розділі 2.

4.1.2 *Необхідні перевірки*

(1) В граничних станах конструкції проект повинен відповідати наступній умові:

$$S_d < R_d \tag{4.1}$$

де S і R представляють будь-який відповідний параметр.

4.1.3 *Втома і циклічна пластичність – малоциклічна пластична втома*

(1) Деталі конструкції, що підлягають різкому місцевому вигину, повинні перевірятися на граничні стани втоми і циклічної пластичності за допомогою процедур, передбачених стандартами EN 1993-1-6 і EN 1993-1-7, відповідно.

(2) Бункери класу наслідків 1 не вимагають перевірки на втому і циклічну пластичність.

4.1.4 *Допуск на стирання і корозію*

(1) Вплив стирання від дії твердих речовин, що зберігаються, на стінки контейнеру на протязі терміну служби конструкції повинен бути включений у аналіз при визначенні ефективної товщини стінки.

(2) Якщо конкретна інформація відсутня, передбачається, що в результаті тертя усієї поверхні при контакті з твердим матеріалом, що рухається, товщина стінки зменшується за рахунок втрати металу на

4 BASIS FOR STRUCTURAL ANALYSIS

4.1 Ultimate limit states

4.1.1 *Basis*

(1) Steel structures and components should be so proportioned that the basic design requirements given in section 2 are satisfied.

4.1.2 *Required checks*

(1) For every relevant limit state, the design shall satisfy the condition:

where S and R represent any appropriate parameter.

4.1.3 *Fatigue* and cyclic plasticity – low cycle fatigue

(1) Parts of the structure subject to severe local bending should be checked against the fatigue and cyclic plasticity limit states using the procedures of EN 1993-1-6 and EN 1993-1-7 as appropriate.

(2) Silos in Consequence Class 1 need not be checked for fatigue or cyclic plasticity.

4.1.4 *Allowance for corrosion and abrasion*

(1) The effects of abrasion of the stored solid on the walls of the container over the life of the structure should be included in determining the effective thickness of the wall for analysis.

(2) Where no specific information is available, the wall should be assumed to lose an amount Δt_a of its thickness due to abrasion at all points on contact with moving solid.

величину Δt_a .

Примітка: Значення Δt_a може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\Delta t_a = 2$ мм.

NOTE: The National Annex may choose the value of Δt_a . The value $\Delta t_a = 2$ mm is recommended.

(3) Вплив корозії на стінку при контакті з твердими речовинами, що зберігаються, протягом терміну служби споруди повинен бути включений у аналіз при визначенні ефективної товщини стіни.

(3) The effects of corrosion of the wall in contact with the stored solid over the life of the structure should be included in determining the effective thickness of the wall for analysis.

(4) Конкретні значення допусків на корозію і стирання при терті, що відповідають визначенному призначенню, мають бути погоджені між проектною організацією, замовником і відповідним повноважним органом з урахуванням визначенної сфери застосування і природи тих твердих речовин, що зберігаються.

(4) Specific values for corrosion and abrasion losses, appropriate to the intended use, should be agreed between the designer, the client and the relevant authority, taking account of the intended use and the nature of the solids to be stored.

Примітка 1: Відповідні значення допусків на втрати металу внаслідок корозії і стирання від тертя при зберіганні певних твердих матеріалів, що знаходяться в контакті з визначеними матеріалами стінок бункера, можуть бути задані в Національному додатку з урахуванням способу переміщення твердих матеріалів, визначених в EN 1991-4.

NOTE 1: The National Annex may choose appropriate values for corrosion and abrasion losses for particular solids in frictional contact with defined silo wall materials, recognising the mode of solids flow defined in EN 1991-4.

Примітка 2: Щоб гарантувати реалізацію проектних припущень в процесі експлуатації, необхідно впровадити відповідні заходи контролю.

NOTE 2: To ensure that the design assumptions are met in service, appropriate inspection measures have to be instituted.

4.1.5 *Допуск на температурні впливи*

(1) Якщо у бункері зберігаються тверді матеріали в гарячому стані, вплив різниці температур між деталями конструкції, що контактують з гарячим матеріалом, і охолодженими деталями має бути врахований при визначені розподілу напруження в стінці.

4.1.5 *Allowance for temperature effects*

(1) Where hot solids are stored in the silo, the effects of differential temperature between parts of the structure in contact with hot material and those that have cooled should be included in determining the stress distribution in the wall.

4.2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ОБОЛОНКОВОГО БУНКЕРА

4.2.1 *Моделювання конструкції оболонки*

(1) Модель оболонкової конструкції повинна відповідати вимогам стандарту EN 1993-1-6. Ці вимоги повинні задовольняти наступним положенням.

(2) Модель оболонкової конструкції повинна включати усі елементи жорсткості, великі отвори і оснащення.

(3) Проект повинен гарантувати, що будуть задоволені визначені граничні умови.

4.2.2 *Методи аналізу*

4.2.2.1 *Загальні положення*

(1) Аналіз оболонки бункера повинен проводитися відповідно до вимог EN 1993-1-6.

(2) До бункера певного класу наслідків завжди можна застосувати аналіз більш високого класу.

4.2.2.2 *Клас наслідків 3*

(1) У бункерах класу наслідків 3 (див. 2.3) внутрішні сили і моменти повинні визначатися за допомогою достовірного чисельного аналізу (згідно з визначенням в EN 1993-1-6). Сили пластичного руйнування в станах основного напруження можуть застосовуватися відносно граничного в'язкотекучого стану згідно з визначенням в EN 1993-1-6.

4.2.2.3 *Клас наслідків 2*

(1) До бункерів класу наслідків 2 в умовах вісесиметричних дій на опорні стійки може застосовуватися один з двох альтернативних методів аналізу:
(a) Мембранна теорія розрахунку оболонок може застосовуватися для визначення основних напружень. Вирази

4.2 ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A SHELL SILO

4.2.1 *Modelling of the structural shell*

(1) The modelling of the structural shell should follow the requirements of EN 1993-1-6. They may be deemed to be satisfied by the following provisions.

(2) The modelling of the structural shell should include all stiffeners, large openings, and attachments.

(3) The design should ensure that the assumed boundary conditions are satisfied.

4.2.2 *Methods of analysis*

4.2.2.1 *General*

(1) The analysis of the silo shell should be carried out according to the requirements of EN 1993-1-6.

(2) A higher class of analysis may always be used than that defined for the Consequence Class.

4.2.2.2 *Consequence Class 3*

(1) For silos in Consequence Class 3 (see 2.3), the internal forces and moments should be determined using a validated numerical analysis (finite element shell analysis) (as defined in EN 1993-1-6). Plastic collapse strengths under primary stress states may be used in relation to the plastic limit state as defined in EN 1993-1-6.

4.2.2.3 *Consequence Class 2*

(1) For silos in Consequence Class 2 under conditions of axisymmetric actions and support, one of two alternative analyses may be used:
a) Membrane theory may be used to determine the primary stresses. Bending theory elastic expressions may be used to

пружності з теорії вигину можуть застосовуватися для визначення усіх локальних дій вигину.

describe all local bending effects.

(б) Може застосовуватися достовірний чисельний аналіз (згідно з визначенням EN 1993-1-6).

b) A validated numerical analysis may be used (e.g. finite element shell analysis) (as defined in EN 1993-1-6).

(2) Якщо проектне навантаження твердих матеріалів, що зберігаються, не може розглядатися як вісесиметричне, має бути застосований достовірний чисельний аналіз.

(2) Where the design loading from stored solids cannot be treated as axisymmetric, a validated numerical analysis should be used.

(3) Незважаючи на положення (2), якщо навантаження по колу оболонки змінюється плавно, викликаючи тільки загальний згин (тобто у вигляді першої гармоніки), для визначення основних напружень можна застосувати мембранну теорію розрахунку оболонок.

(3) Notwithstanding paragraph (2), where the loading varies smoothly around the shell causing global bending only (i.e. in the form of harmonic 1), membrane theory may be used to determine the primary stresses.

(4) Для аналізу дій внаслідок вітрового навантаження, і/або осадки фундаменту і/або плавних змін навантаження на окремі ділянки (див. EN 1991-4 по тонкостінних бункерах) можна застосувати напівмоментну або мембранну теорію розрахунку оболонок.

(4) For analyses of actions due to wind loading and/or foundation settlement and/or smoothly varying patch loads (see EN 1991-4 for thin walled silos), semi-membrane theory or membrane theory may be used.

(5) Якщо для визначення основного напруження в оболонці застосовується мембранна теорія:

(5) Where membrane theory is used to find the primary stresses in the shell:

а) Відособлені кільця, прикріплені до ізотропної циліндричної оболонки бункера під дією внутрішнього тиску, можуть вважатися такими, що мають корисну площу, яка вміщує довжину оболонки вище і нижче кольця $0,78\sqrt{rt}$, за винятком випадку, коли кільце знаходиться на перехідному з'єднанні.

a) Discrete rings attached to an isotropic cylindrical silo shell under internal pressure may be deemed to have an effective area which includes a length of shell above and below the ring of $0,78\sqrt{rt}$ except where the ring is at a transition junction.

б) Вплив локального згинаючого зусилля в місцях, де порушена цілісність поверхні оболонки або опорних стійок, повинна оцінюватися окремо.

b) The effect of local bending stresses at discontinuities in the shell surface and supports should be evaluated separately.

(6) Якщо ізотропна стінка оболонки підсилена відособленими вертикальними ребрами жорсткості, напруження ребер жорсткості і стінки оболонки можна розрахувати, приймаючи напруження ребер жорсткості як «розподілене» по стінці оболонки за умови, що інтервал між ребрами жорсткості складає не

(6) Where an isotropic shell wall is discretely stiffened by vertical stiffeners, the stresses in the stiffeners and the shell wall may be calculated by treating the stiffeners as smeared on the shell wall, provided the spacing of the stiffeners is no wider than $n_{vs}\sqrt{rt}$.

більше $n_{vs}\sqrt{rt}$.

Примітка: Значення n_{vs} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $n_{vs} = 5$.

NOTE: The National Annex may choose the value of n_{vs}. The value $n_{vs} = 5$ is recommended.

(7) Якщо застосовуються розподілені ребра жорсткості, напруження в ребрі жорсткості повинне визначатися з урахуванням належного допуску на сумісність ребра жорсткості із стінкою, включаючи вплив мембранного напруження стінки в ортогональному напрямі.

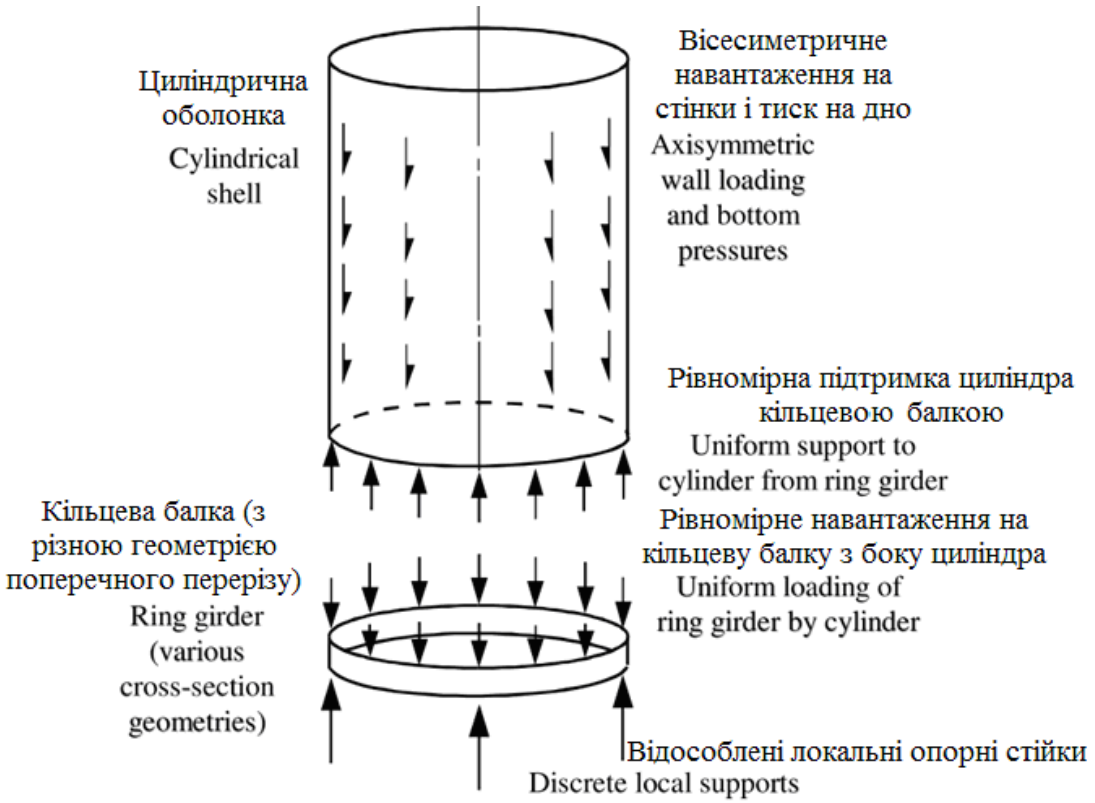
(7) Where smeared stiffeners are used, the stress in the stiffener should be determined making proper allowance for compatibility between the stiffener and the wall and including the effect of the wall membrane stress in the orthogonal direction.

(8) Якщо кільцева балка змонтована вище відособлених опорних стійок, для визначення основного напруження можна застосувати мембранну теорію; при цьому необхідно дотримуватися вимог 5.4 і 8.1.4, що стосуються оцінки додаткового не вісесиметричного основного напруження.

(8) Where a ring girder is used above discrete supports, membrane theory may be used to determine the primary stresses, but the requirements of 5.4 and 8.1.4 concerning the evaluation of additional non-axisymmetric primary stresses should be followed.

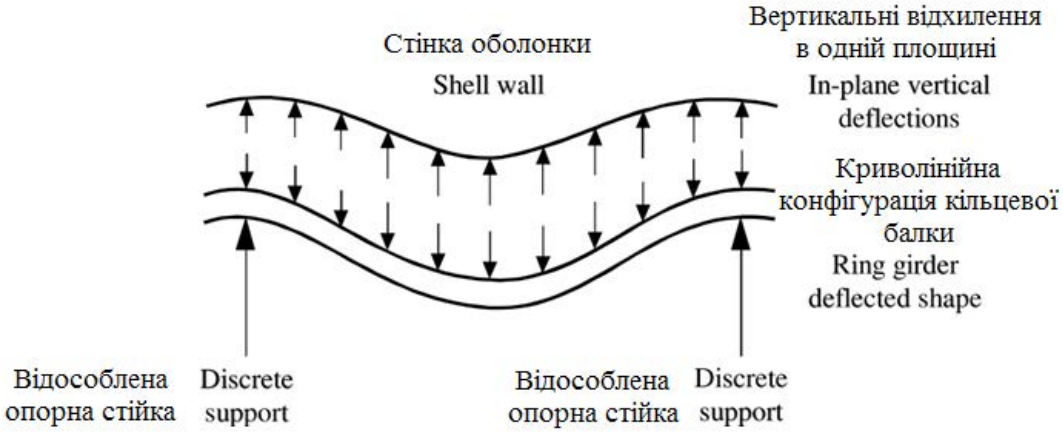
(9) Якщо кільцева балка змонтована вище відособлених опорних стійок, повинна враховуватися сумісність деформацій між кільцевою балкою і суміжними сегментами оболонки; див. рисунок 4.1. Особливу увагу слід звернути на сумісність осьових деформацій, оскільки складне напруження глибоко проникає в оболонку. Якщо використовується така кільцева балка, необхідно врахувати ексцентриситет центру тяжіння кільцевої балки і центра зсуву відносно стінки оболонки і центрової лінії опорної стійки; див. 8.1.4 і 8.2.3.

(9) Where a ring girder is used above discrete supports, compatibility of the deformations between the ring and adjacent shell segments should be considered, see Figure 4.1. Particular attention should be paid to compatibility of the axial deformations, as the induced stresses penetrate far up the shell. Where such a ring girder is used, the eccentricity of the ring girder centroid and shear centre relative to the shell wall and the support centreline should be considered, see 8.1.4 and 8.2.3.



а) традиційна модель проекту бункерів на опорних стійках

a) Traditional design model for column-supported silos



б) умова деформації циліндра, викликана сумісністю

b) Deformation requirement on cylinder imposed by compatibility with beam deformation

Рисунок 4.1 Сумісність осьових деформацій кільцевої балки і оболонки

Figure 4.1 Axial deformation compatibility between ring girder and shell

(10) Якщо бункер підлягає будь-якому асиметричному навантаженню сипучих твердих матеріалів (точковим навантаженням, нецентрованому розвантаженню, асиметричному заповненню тощо), проект моделі конструкції повинен охопити передачу мембранного зсуву в стінці бункера і між стіною і кільцями.

(10) Where the silo is subject to any form of unsymmetrical bulk solids loading (patch loads, eccentric discharge, unsymmetrical filling etc.), the structural model should be designed to capture the membrane shear transmission within the silo wall and between the wall and rings.

Примітка: Передача зсуву між частинами стінки і кільцями має особливе значення в конструкціях, де використовуються болти і інші відособлені сполучні засоби (наприклад, між стінкою і хопером, між окремими поясами корпусу).

(11) Якщо для перерозподілу навантаження в стінці бункера на відособлені опори використовується кільцева балка і якщо для з'єднання елементів конструкції використовуються болти або інші відособлені сполучні засоби, необхідно визначити передачу зсуву між частинами кільця внаслідок ефекту вигину оболонки і кільцевої балки.

(12) За винятком випадків, коли застосовується раціональний аналіз і є чіткий доказ того, що під час розвантаження твердий матеріал не рухається відносно стінки, жорсткість сипучого твердого матеріалу при опорі деформаціям стінки або збільшенні опору вигину конструкції не повинна враховуватися.

4.2.2.4 *Клас наслідків 1*

(1) До бункерів класу наслідків 1 може застосовуватися мембранна теорія для визначення основного напруження з коефіцієнтами і спрощеними виразами, що описують локальні згинаючи сили і асиметричні дії.

4.2.3 *Геометричні вади*

(1) Геометричні вади оболонки повинні задовольняти обмеженням, визначеним в EN 1993-1-6.

(2) У бункерах з класом наслідків 2 і 3 геометричні вади повинні вимірюватися після спорудження, щоб забезпечити досягнення визначеного рівня допусків на виготовлення.

(3) Геометричні вади оболонки не повинні відкрито включатися у визначення внутрішніх сил і моментів, за

NOTE: The shear transmission between parts of the wall and rings has special importance in construction using bolts or other discrete connectors (e.g. between the wall and hopper, between different strakes of the barrel).

(11) Where a ring girder is used to redistribute silo wall forces into discrete supports, and where bolts or discrete connectors are used to join the structural elements, the shear transmission between the parts of the ring due to shell bending and ring girder bending phenomena should be determined.

(12) Except where a rational analysis is used and there is clear evidence that the solid against the wall is not in motion during discharge, the stiffness of the bulk solid in resisting wall deformations or in increasing the buckling resistance of the structure should not be considered.

4.2.2.4 *Consequence Class 1*

(1) For silos in Consequence Class 1, membrane theory may be used to determine the primary stresses, with factors and simplified expressions to describe local bending effects and unsymmetrical actions.

4.2.3 *Geometric imperfections*

(1) Geometric imperfections in the shell should satisfy the limitations defined in EN 1993-1-6.

(2) For silos in Consequence Classes 2 and 3, the geometric imperfections should be measured following construction to ensure that the assumed fabrication tolerance quality has been achieved.

(3) Geometric imperfections in the shell need not be explicitly included in determining the internal forces and moments, except where

винятком тих випадків, коли аналіз GNIA або GMNIA застосовується у відповідності до стандарту EN 1993-1-6.

4.3 Аналіз коробчатої конструкції прямокутного бункера

4.3.1 ***Моделювання конструкції короба***

(1) Модель конструкції короба повинна відповідати вимогам стандарта EN 1993-1-7. Ці вимоги повинні задовольняти наступним положенням.

(2) Модель конструкції короба повинна включати усі елементи жорсткості, великі отвори і обладнання.

(3) Проект повинен гарантувати, що будуть задоволені визначені граничні умови.

(4) З'єднання сегментів короба повинні задовольняти модельним припущенням по міцності і жорсткості.

(5) Кожну панель короба можна розглядати як окремий листовий сегмент за наявності наступних умов:
а) включені сили і моменти, привнесені до кожної панелі суміжними елементами;
б) включена жорсткість на згин суміжних панелей.

(6) Якщо ізотропна панель листової стінки укріплена відособленими горизонтальними ребрами жорсткості, напруження в ребрах жорсткості і в стінці короба можна розрахувати, розглядаючи ребра жорсткості як розподілені по стінці, щоб отримати ортотропний лист за умови, що інтервал між ребрами жорсткості не перевищує $n_s t$.

Примітка: Значення n_s може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $n_s = 40$.

(7) Якщо застосовуються розподілені ребра жорсткості, напруження в ребрі повинне визначатися з врахуванням належного допуску на ексцентриситет

a GNIA or GMNIA analysis is used, as defined in EN 1993-1-6.

4.3 ANALYSIS OF THE BOX STRUCTURE OF A RECTANGULAR SILO

4.3.1 ***Modelling of the structural box***

(1) The modelling of the structural box should follow the requirements of EN 1993-1-7, but they may be deemed to be satisfied by the following provisions.

(2) The modelling of the structural box should include all stiffeners, large openings, and attachments.

(3) The design should ensure that the assumed boundary conditions are satisfied.

(4) The joints between segments of the box should satisfy the modelling assumptions for strength and stiffness.

(5) Each panel of the box may be treated as an individual plate segment provided that both:
a) the forces and moments introduced into each panel by its neighbours are included;

b) the flexural stiffness of adjacent panels is included.

(6) Where an isotropic plate wall panel is discretely stiffened with horizontal stiffeners, the stresses in the stiffeners and the box wall may be calculated by treating the stiffeners as smeared on the wall to produce an orthotropic plate, provided that the spacing of the stiffeners is no wider than $n_s t$.

NOTE: The National Annex may choose the value of n_s . The value $n_s = 40$ is recommended.

(7) Where smeared stiffeners are used, the stress in the stiffener should be determined making proper allowance for the eccentricity of the stiffener from the wall plate, and for the

ребра жорсткості відносно листа стінки і на напруження стінки в ортогональному напрямі відносно осі ребра жорсткості.

(8) Ефективна ширина листа з кожного боку ребра жорсткості не повинна перевищувати значення $n_{ew}t$, де t представляє локальну товщину листа.

Примітка: Значення n_{ew} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $n_{ew} = 16$.

4.3.2 *Геометричні вади*

(1) Геометричні вади короба повинні задовольняти обмеженням, визначеним в стандарті EN 1993-1-7.

(2) Геометричні вади короба не повинні відкрито включатися у визначення внутрішніх сил і моментів

4.3.3 *Методи аналізу*

(1) Внутрішні сили в листових сегментах стінки короба можуть бути визначені з використанням:
а) статичної рівноваги мембранних сил і теорії балок при вигині;
б) аналізу на основі теорії лінійного вигину і розтягу листа;
с) аналізу на основі теорії нелінійного вигину і розтягу листа.

(2) До бункерів з класом наслідків 1 може застосовуватися метод (а) з (1).

(3) Якщо проектна умова навантаження симетрична відносно кожного листового сегменту, а бункер відноситься до класу наслідків 2, можна застосувати метод (а) з (1).

(4) Якщо проектна умова навантаження несиметрична, а бункер відноситься до класу наслідків 2, слід застосувати метод (б) або метод (с) з (1).

wall stress in the direction orthogonal to the axis of the stiffener.

(8) The effective width of plate on each side of a stiffener should be taken as not greater than $n_{ew}t$, where t is the local plate thickness.

NOTE: The National Annex may choose the value of n_{ew}. The value $n_{ew} = 16$ is recommended.

4.3.2 *Geometric imperfections*

(1) Geometric imperfections in the box should satisfy the limitations defined in EN 1993-1-7.

(2) Geometric imperfections in the box need not be explicitly included in determining the internal forces and moments.

4.3.3 *Methods of analysis*

(1) The internal forces in the plate segments of the box wall may be determined using either:
a) static equilibrium for membrane forces and beam theory for bending;
b) an analysis based on linear plate bending and stretching theory;
c) an analysis based on nonlinear plate bending and stretching theory.

(2) For silos in Consequence Class 1, method (a) in (1) may be used.

(3) Where the design loading condition is symmetric relative to each plate segment and the silo is in Consequence Class 2, method (a) in (1) may be used.

(4) Where the design loading condition is not symmetric and the silo is in Consequence Class 2, either method (b) or method (c) in (1) should be used.

(5) У бункерах з класом наслідків 3 (див. 2.3) внутрішні сили і моменти повинні визначатися за допомогою методу (б) або методу (с) з (1) (згідно з визначенням EN 1993-1-7).

(5) For silos in Consequence Class 3 (see 2.3), the internal forces and moments should be determined using either method (b) or method (c) in (1) (as defined in EN 1993-1-7).

4.4 Еквівалентні ортотропні властивості обшивки з гофрованого листа

(1) Якщо частиною конструкції бункера є обшивка з гофрованого листа, можна провести її аналіз, розглядаючи обшивку в якості еквівалентної однорідної ортотропної стінки.

(2) При аналізі напруженнь і вигинів можна досліджувати вказані нижче властивості конструкції за умови, що профіль гофра має арктангенциальну або синусоїдальну конфігурацію. Якщо застосовуються інші профілі гофра, відповідні властивості слід розраховувати на основі первинних принципів.

4.4 Equivalent orthotropic properties of corrugated sheeting

(1) Where corrugated sheeting is used as part of the silo 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. Where other corrugation profiles are used, the corresponding properties should be calculated from first principles.

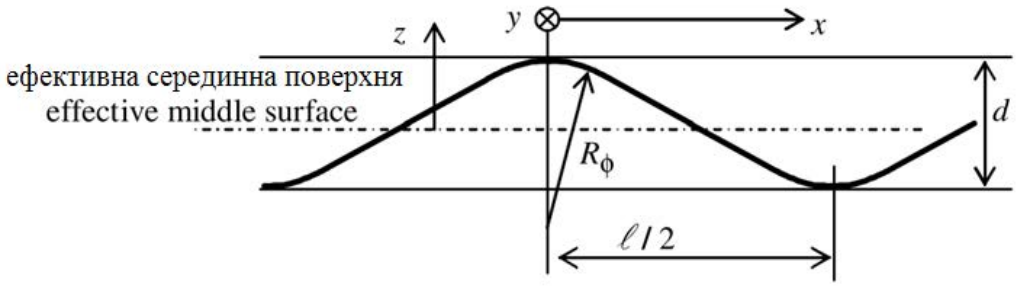


Рисунок 4.2 Профіль гофра і геометричні параметри
Figure 4.2 Corrugation profile and geometric parameters

(3) Властивості гофрованої листової обшивки повинні визначатися у рамках системи координат *x, y*, в якій вісь *y* розташована паралельно складкам гофра (прямим лініям на поверхні), а вісь *x* розташована перпендикулярно складкам гофра (гребеням і западинам). Незалежно від актуальної конфігурації, гофр повинен визначатися нижченаведеними параметрами (див. рисунок 4.2):

де:

d це відстань від гребеня до гребеня;

l це довжина хвилі гофра;

R_φ це локальний радіус гребеня або западини.

(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 4.2:

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.

(4) Усі властивості можуть наводитися як такі, що мають одну керовану координату; вони не викликають ефекти Пуассона у різних напрямах.

(4) All properties may be treated as one-dimensional, giving no Poisson effects between different directions.

(5) Еквівалентні мембранні властивості (жорсткість при розтязі) можна виразити так:

(5) The equivalent membrane properties (stretching stiffnesses) may be taken as:

$$C_x = Et_x = E\frac{2r^3}{3d^2} \tag{4.2}$$

$$C_y = Et_y = Et\left(1+\frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right) \tag{4.3}$$

$$C_{xy} = Gt_{xy} = \frac{Gt}{\left(1+\frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right)} \tag{4.4}$$

де:

t_x еквівалентна товщина розподілених мембранних сил, перпендикулярних гофрам;

t_y еквівалентна товщина розподілених мембранних сил, паралельних гофру;

t_{xy} еквівалентна товщина розподілених мембранних поперечних сил.

where:

t_x is the equivalent thickness for smeared membrane forces normal to the corrugations;

t_y is the equivalent thickness for smeared membrane forces parallel to the corrugations;

t_{xy} is the equivalent thickness for smeared membrane shear forces.

(6) Еквівалентні згинаючі властивості (жорсткість на згин) визначаються згинаючою жорсткістю у моментах, що викликають згин в цьому напрямі. Вони можуть бути виражені так:

(6) The equivalent bending properties (flexural stiffnesses) are defined in terms of the flexural rigidity for moments causing bending in that direction, and may be taken as:

$$D_x = EI_x \frac{на_одиницю_ширини}{per_unit_width} = \frac{Et^3}{12\left(1-v^2\right)} \cdot \frac{1}{\left(1+\frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right)} \tag{4.5}$$

$$D_y = EI_y \frac{на_одиницю_ширини}{per_unit_width} = 0{,}13Etd^2 \tag{4.6}$$

$$D_{xy} = GI_{xy} \frac{на_одиницю_ширини}{per_unit_width} = \frac{Gt^3}{12}\left(1+\frac{\pi^2 d^2}{4l^2}\right) \tag{4.7}$$

де:

I_x еквівалентний момент інерції площі перерізу на одиницю ширини для розподіленого вигину перпендикулярно гофру;

I_y еквівалентний момент інерції площі перерізу на одиницю ширини для розподіленого вигину паралельно гофру;

where:

I_x is the equivalent second moment of area per unit width for smeared bending normal to the corrugations;

I_y is the equivalent second moment of area per unit width for smeared bending parallel to the corrugations;

I_{xy} еквівалентний момент інерції площі перерізу на одиницю ширини для скручування.

Примітка 1: Умовне позначення моментів вигину стосується напряму, в якому формується кривизна листа, тобто по суті воно протилежне до позначення, прийнятого для балок. Згин паралельно гофрам пов'язаний із згинаючою жорсткістю гофрованого профілю і являється головною причиною для застосування гофрованих конструкцій.

Примітка 2: Альтернативні вирази еквівалентних ортотропних властивостей гофрованої листової обшивки приведені в посиланнях, що містяться в Додатку D.

(7) В циліндричних бункерах, де гофр спрямований по колу, напрями x і y у вище наведених виразах мають бути прийняті як меридіальне φ і кільцеве θ напрями, відповідно; див. рисунок 1.2(a). Якщо гофр спрямований у меридіальному напрямі, напрями x і y в вище наведених виразах повинні використовуватися як кільцевий θ і меридіальний φ напрями, відповідно.

(8) Властивості зсуву повинні розглядатися як незалежні від орієнтації гофра. Значення G може бути прийнято як E / {2(1+v)} = 80 800 МПа.

(9) В прямокутних бункерах, де гофр розташований горизонтально, напрями x і y в приведених вище виразах мають бути прийняті як локальний осьовий x і горизонтальний y напрям, відповідно; див. рисунок 1.3(a). Якщо гофри мають вертикальний або меридіальний напрям, напрями x і y в приведених вище виразах мають бути сформульовані на основі реальної конструкції і розглядатимуться як горизонтальний y і осьовий x напрями, відповідно.

I_{xy} is the equivalent second moment of area per unit width for twisting.

NOTE 1: The convention for bending moments in plates relates to the direction in which the plate becomes curved, so is contrary to the convention used for beams. 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 Annex D.

(7) In circular silos, where the corrugations run circumferentially, the directions x and y in the above expressions should be taken as the meridional φ and circumferential θ directions respectively, see figure 1.2 (a). When the corrugations run meridionally, the directions x and y in the above expressions should be taken as the circumferential θ and meridional φ directions respectively.

(8) The shearing properties should be taken as independent of the corrugation orientation. The value of G may be taken as E / {2(1+v)} = 80 800 MPa.

(9) In rectangular silos, where the corrugations run horizontally, the directions x and y in the above expressions should be taken as the local axial x and horizontal y directions respectively, see figure 1.3 (a). When the corrugations run vertically or meridionally, the directions x and y in the above expressions should be interchanged on the real structure and taken as the horizontal y and axial x directions respectively.

5 ПРОЕКТУВАННЯ СТІНОК ЦИЛІНДРУ

5.1 Основа

5.1.1 *Загальні положення*

(1) Циліндричні сталеві стінки бункера мають бути співвіднесені так, щоб виконувалися основні проектні вимоги до крайніх граничних станів, вказані у розділі 2.

(2) Оцінка безпеки циліндричної оболонки повинна виконуватися на підставі положень стандарта EN 1993-1-6.

5.1.2 *Проект стінки бункера*

(1) Перевірка циліндричної стінки бункера повинна здійснюватися по граничних станах, передбачених стандартом EN 1993-1-6, за наступними параметрами:
– загальна стійкість і статична рівновага.

LS1: стан межі пластичності
– опір розриву, утворенню тріщин і механізму пластичного руйнування (надмірній пластичності) під впливом внутрішнього тиску і інших дій;
– опір стиків (з'єднань).

LS2: стан розвитку циклічної пластичності
– опір локальної піддатливості при вигині;
– локальні ефекти.

5 DESIGN OF CYLINDRICAL WALLS

5.1 Basis

5.1.1 *General*

(1) Cylindrical steel silo walls should be so proportioned that the basic design requirements for the ultimate limit states given in section 2 are satisfied.

(2) The safety assessment of the cylindrical shell should be conducted using the provisions of EN 1993-1-6.

5.1.2 *Silo wall design*

(1) The cylindrical wall of the silo should be checked for the following phenomena under the limit states defined in EN 1993-1-6:

− global stability and static equilibrium.

LS1: plastic limit state
− resistance to bursting or rupture or plastic mechanism collapse (excessive yielding) under internal pressures or other actions;
− resistance of joints (connections).

LS2: cyclic plastification

− resistance to local yielding in bending;

− local effects.

LS3: повздовжній прогин
– опір втраті подовжньої стійкості при осьовому стиску;
– опір втраті подовжньої стійкості при зовнішньому тиску (вітру або розрідженості);
– опір втраті подовжньої стійкості при зсуві в результаті асиметричних дій;
– опір втраті подовжньої стійкості при зсуві в зоні півколон;
– опір локальному руйнуванню над опорними стійками;
– опір локальним пошкодженням навколо отворів;
– опір локальному прогину в результаті асиметричних дій;

LS4: стан втоми
– опір втомному руйнуванню.

(2) Стінка оболонки повинна відповідати положенням EN 1993-1-6, за виключенням випадків, коли відповідність вимогам цього стандарту забезпечується згідно 5.3 – 5.6.

(3) У бункерах, з класом наслідків 1 для стану циклічної пластичності і втоми граничних станів може ігноруватися.

5.2 Відмінності між формами циліндричних оболонок

(1) В стінці оболонки, виготовленої з плоских катаних сталевих листів, що називаються ізотропними (див. рисунок 5.1), параметри опору повинні визначатися згідно 5.3.2.

(2) В стінці оболонки, виготовленої з гофрованих сталевих листів, у яких западини, так звані горизонтальні гофри (див. рисунок 5.1), розташовані уздовж кола бункера, параметри опору повинні визначатися згідно 5.3.4. У стінках оболонки, де западини, так звані вертикальні гофри, розташовані уздовж лінії меридіана, параметри опору повинні визначатися згідно 5.3.5.

LS3: buckling
− resistance to buckling under axial compression;
− resistance to buckling under external pressure (wind or vacuum);

− resistance to buckling under shear from unsymmetrical actions;
− resistance to buckling under shear near engaged columns;
− resistance to local failure above supports;

− resistance to local crippling near openings;

− resistance to local buckling under unsymmetrical actions;

LS4: fatigue
− resistance to fatigue failure.

(2) The shell wall should satisfy the provisions of EN 1993-1-6, except where 5.3 to 5.6 provide conditions that are deemed to satisfy the provisions of that standard.

(3) For silos in Consequence Class 1, the cyclic plasticity and fatigue limit states may be ignored.

5.2 Distinctions between cylindrical shell forms

(1) For a shell wall constructed from flat rolled steel sheet, termed 'isotropic' (see figure 5.1), the resistances should be determined as defined in 5.3.2.

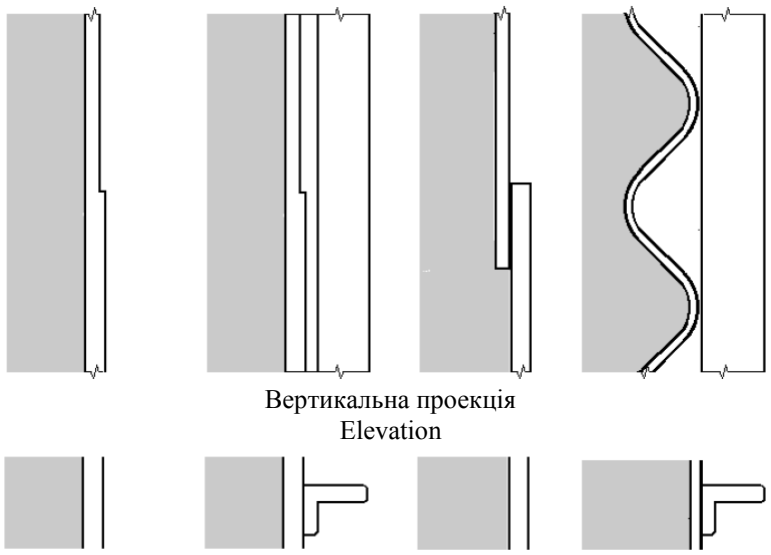
(2) For a shell wall constructed from corrugated steel sheets where the troughs run around the silo circumference, termed 'horizontally corrugated' (see figure 5.1), the resistances should be determined as defined in 5.3.4. For a shell wall with the troughs running up the meridian, termed 'vertically corrugated', the resistances should be determined as defined in 5.3.5.

(3) В стінці оболонки, що має ребра жорсткості, прикріплені із зовнішнього боку, так зване, зовнішнє посилення незалежно від інтервалів між ребрами жорсткості, параметри опори повинні визначатися згідно 5.3.3.

(3) For a shell wall with stiffeners attached to the outside, termed 'externally stiffened' irrespective of the spacing of the stiffeners, the resistances should be determined as defined in 5.3.3.

(4) В стінці оболонки, суміжні листи якої з'єднуються внахлест, утворюючи, так звані, секції, що перекриваються (див. рисунок 5.1) в місцях з'єднання, параметри опору повинні визначатися згідно 5.3.2.

(4) For a shell wall with lap joints formed by connecting adjacent plates with overlapping sections, termed 'lap-jointed' (see figure 5.1), the resistances should be determined as defined in 5.3.2.



Вертикальна проекція
Elevation

План
Plan

Ізотропні стінки, сполучені внахлест, із зовнішніми ребрами жорсткості і горизонтально орієнтованими гофрами
Isotropic, externally stiffened, lap-jointed and horizontally corrugated walls

Рисунок 5.1 Ілюстрації конфігурацій циліндричної оболонки
Figure 5.1 Resistance of silo cylindrical walls

5.3 Опір циліндричних стінок бункера

5.3 Resistance of silo cylindrical walls

5.3.1 *Загальні положення*

(1) Циліндрична оболонка повинна задовольняти вимоги EN 1993-1-6. Вони можуть бути виконані за допомогою оцінки проектного опору згідно з нижченаведеними критеріями.

5.3.1 *General*

(1) The cylindrical shell should satisfy the provisions of EN 1993-1-6. These may be met using the following assessments of the design resistance.

5.3.2 *Ізотропні стінки на зварних і болтових з'єднаннях*

5.3.2.1 *Загальні положення*

(1) Поперечний переріз стінки оболонки повинен мати площу, що забезпечує відповідний опір розриву або пластичному руйнуванню.

(2) З'єднання мають бути співрозмірними опору на розрив в площі перерізу нетто при граничній міцності на розтяг.

(3) Коли це доречно при оцінці міцності на розтяг повинен включатися ексцентриситет поясних з'єднань стінки.

(4) Стінка оболонки повинна забезпечувати відповідний опір втраті стійкості.

5.3.2.2 *Оцінка результуючого розрахункового напруження*

(1) Якщо це необхідно, результуюча розрахункового напруження під впливом внутрішнього тиску, сил від тертя на стінки і всіх істотних розрахункових навантажень повинні визначатися в усіх точках оболонки при різних значеннях внутрішнього тиску і тертя зчеплення із стінкою.

Примітка 1: Кожен набір результуючих розрахункового напруження при завантаженні у бункер на зберігання твердого матеріалу повинен грунтуватися на єдиному наборі властивостей твердого матеріалу, що зберігається.

Примітка 2: Якщо результуючі розрахункового напруження оцінюються з метою верифікації достатності опору стану граничної пластичності, як правило, властивості твердого матеріалу, що зберігається, повинні вибиратися з метою максимального підвищення внутрішнього тиску і зняття локальних навантажень згідно EN 1991-4.

Примітка 3: Якщо результуючі розрахункового напруження оцінюються з метою верифікації достатності опору стану граничного прогину під навантаженням твердого матеріалу, що зберігається, як правило, властивості твердого матеріалу, що зберігається, повинні вибиратися з метою максимального підвищення осьового стиску і зняття локальних навантажень згідно стандарту EN 1991-4. Але, якщо внутрішній тиск

5.3.2 *Isotropic welded or bolted walls*

5.3.2.1 *General*

(1) The shell wall cross-section should be proportioned to resist failure by rupture or plastic collapse.

(2) The joints should be proportioned to resist rupture on the net section using the ultimate tensile strength.

(3) The eccentricity of lap joints should be included in the strength assessment for rupture, when relevant.

(4) The shell wall should be proportioned to resist stability failure.

5.3.2.2 *Evaluation of design stress resultants*

(1) Under internal pressure, frictional traction and all relevant design loads, the design stress resultants should be determined at every point in the shell using the variation in internal pressure and wall frictional traction, as appropriate.

NOTE 1: Each set of design stress resultants for stored solid loading of a silo should be based on a single set of stored solid properties.

NOTE 2: Where the design stress resultants are being evaluated to verify adequate resistance to the plastic limit state, in general the stored solid properties should be chosen to maximise the internal pressure and the condition of discharge with patch loads in EN 1991-4 should be chosen.

NOTE 3: Where the design stress resultants are being evaluated to verify adequate resistance to the buckling limit state under stored solid loads, in general the stored material properties should be chosen to maximise the axial compression and the condition of discharge with patch loads in EN 1991-4 should be chosen. However, where the internal pressure is beneficial in increasing the buckling resistance, only the filling pressures (for a consistent set of material properties) should be adopted

виявиться корисним для підвищення опору прогину, мають бути прийняті тільки тиск наповнення (для несуперечливої безлічі властивостей матеріалу) разом з осьовими розвантажувальними силами, оскільки корисний тиск може місцями впасти до значень тиску наповнення, хоча осьовий стиск і виводиться із стану розвантаження.

in conjunction with the discharge axial forces, since the beneficial pressures may fall to the filling values locally even though the axial compression derives from the discharge condition.

(2) Коли для оцінки розрахункового напруження в стінці оболонки застосовується мембранна теорія, опір оболонки має бути достатнім, щоб витримати найвищий тиск в усіх точках.

(2) Where membrane theory is used to evaluate design stresses in the shell wall, the resistance of the shell should be adequate to withstand the highest pressure at every point.

(3) Оскільки встановлено, що тиск високої міри локалізації викликає менші результуючі розрахункового мембранного тиску, ніж ті що визначені за допомогою мембранної теорії, для досягнення більш економічного проектного рішення при визначені розрахункового напруження, використовується безпосереднє або комп'ютерне проектування із застосовунням положення EN 1993-1-6.

(3) Because highly localised pressures are found to induce smaller design membrane stress resultants than would be found using membrane theory, the provisions of EN 1993-1-6 for stress design, direct design or computer design may be used to achieve a more economical design solution.

(4) Коли застосовується аналіз мембранної теорії, отримане двовимірне поле результуючих напружень $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ і $n_{x\theta,Ed}$ можна оцінювати за допомогою еквіва-лентного розрахункового напруження:

(4) Where a membrane theory analysis is used, the resulting two dimensional stress field of stress resultants $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$ and $n_{x\theta,Ed}$ may be evaluated using the equivalent design stress:

$$\sigma_{e,Ed} = \frac{1}{t}\sqrt{n_{x,Ed}^2 + n_{\theta,Ed}^2 - n_{x,Ed}n_{\theta,Ed} + 3n_{x\theta,Ed}^2} \tag{5.1}$$

(5) Коли застосовується аналіз теорії пружних деформацій при вигині (LA), отримане двовимірне поле результуючих основних напружень $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$, $m_{x,Ed}$, $m_{\theta,Ed}$, $m_{x\theta,Ed}$ може бути трансформовано у фіктивні компоненти напруження:

(5) Where an elastic bending theory analysis (LA) is used, the resulting two dimensional stress field of primary stress resultants $n_{x,Ed}$, $n_{\theta,Ed}$, $n_{x\theta,Ed}$, $m_{x,Ed}$, $m_{\theta,Ed}$, $m_{x\theta,Ed}$ may be transformed into the fictitious stress components:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{x,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x,Ed}}{t^2/4},\ \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{\theta,Ed}}{t^2/4}, \tag{5.2}$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta,Ed}}{t} \pm \frac{m_{x\theta,Ed}}{t^2/4}, \tag{5.3}$$

і в еквівалентні розрахункові напруження

and the von Mises equivalent design stress:

за критеріем фон Мізеса :

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3\tau_{x\theta,Ed}^2} \quad (5.4)$$

Примітка: Приведені вище вирази (критерій текучості Ілюшина) в цілях проектування дають спрощені еквівалентні напруження.

NOTE: The above expressions (Ilyushin yield criterion) give a simplified conservative equivalent stress for design purposes.

5.3.2.3 *Граничний стан пластичності*

(1) Розрахунковий опір в листах, виражений результуючими мембранного напруження, повинен оцінюватися як еквівалентний опір напруженню конструкції на зварних і болтових з'єднаннях $f_{e,Rd}$ представленому наступною формулою:

5.3.2.3 *Plastic limit state*

(1) The design resistance in plates in terms of membrane stress resultants should be assessed as the equivalent stress resistance for both welded and bolted construction $f_{e,Rd}$ given by:

$$f_{e,Rd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (5.5)$$

(2) Розрахунковий опір з'єднань внахлест в зварній конструкції $f_{e,Rd}$ повинен оцінюватись за допомогою критерію фіктивної міцності:

(2) The design resistance at lap joints in welded construction $f_{e,Rd}$ should be assessed by the fictitious strength criterion:

$$f_{e,Rd} = j \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (5.6)$$

де j – коефіцієнт міцності з'єднання.

where j is the joint efficiency factor.

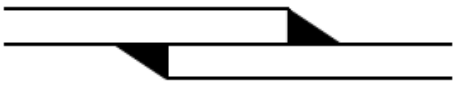
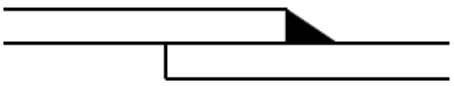
(3) Міцність з'єднання зварних деталей із заповненими безперервними кутовими швами має бути прийнята за величину $j = j_i$.

(3) The joint efficiency of lap joint welded details with full continuous fillet welds should be taken as $j = j_i$.

Примітка: Значення j_i може бути задане в Національному додатку. Рекомендовані значення j_i для з'єднань різної конфігурації приведені нижче. Поодиноке зварне з'єднання внахлест не повинне застосовуватися, якщо більше 20 % значення $\sigma_{e,Ed}$ у виразі 5.4 виводиться з моментів вигину.

NOTE: The National Annex may choose the value of j_i. The recommended values of j_i are given in below for different joint configurations. The single welded lap joint should not be used if more than 20% of the value of $\sigma_{e,Ed}$ in expression 5.4 derives from bending moments.

Міцність з'єднання j_i зварних швів внахлест
Joint efficiency j_i of welded lap joints

Тип з'єднання Joint type	Ескіз Sketch	Значення j_i Value of j_i
Двосторонній зварний шов внахлест Double welded lap		$j_1 = 1,0$
Односторонній зварний шов внахлест Single welded lap		$j_2 = 0,35$

(4) У болтовій конструкції розрахунковий опір з'єднання в площі перерізу нетто повинен оцінюватися за допомогою результуючих мембранного напруження таким чином:

- меридіальний опір
(for meridional resistance)
- кільцевий опір
(for circumferential resistance)
- опір зсуву
(for shear resistance)

(4) In bolted construction the design resistance at net section failure at the joint should be assessed in terms of membrane stress resultants as follows:

$$n_{x,Rd} = f_u \cdot t / \gamma_{M2} \quad (5.7)$$

$$n_{\theta,Rd} = f_u \cdot t / \gamma_{M2} \quad (5.8)$$

$$n_{\theta,Rd} = 0,57 \cdot f_y \cdot t / \gamma_{M2} \quad (5.9)$$

(5) Проектування болтових з'єднань повинне виконуватися у відповідності до EN 1993-1-8 або EN 1993-1-3. Згідно EN 1993-1-1 при необхідності повинен враховуватися вплив кріпильних отворів при відповідних вимогах до розтягу, стиску або зсуву.

(5) The design of bolted connections should be carried out in accordance with EN 1993-1-8 or EN 1993-1-3. The effect of fastener holes should be taken into account according to EN 1993-1-1 using the appropriate requirements for tension or compression or shear as appropriate.

(6) Опір локальним навантаженням в результаті кріплення обладнання повинен розподілятися згідно з детальним описом в 5.4.6.

(6) The resistance to local loads from attachments should be dealt with as detailed in 5.4.6.

(7) В усіх точках конструкції розрахункове напруження повинне задовольняти наступній умові:

(7) At every point in the structure the design stresses should satisfy the condition:

$$\sigma_{e,Ed} \le f_{e,Rd} \quad (5.10)$$

(8) В усіх точках конструкції результуючі розрахункового напруження повинні задовольняти відповідним умовам, серед яких є наступні :

(8) At every joint in the structure the design stress resultants should satisfy the relevant conditions amongst:

$$n_{x,Ed} \le n_{x,Rd} \quad (5.11)$$

$$n_{\theta,Ed} \le n_{\theta,Rd} \quad (5.12)$$

$$n_{x\theta,Ed} \le n_{x\theta,Rd} \quad (5.13)$$

5.3.2.4 *Повздовжній згин під впливом осьового стиску*

5.3.2.4 *Buckling under axial compression*

(1) При осьовому стиску розрахунковий опір повздовжньому вигину повинен визначатися в усіх точках

(1) Under axial compression, the design resistance against buckling should be determined at every pointin the shell using the

оболонки з використанням встановленних нормативних допусків на виготовлення будівельних конструкцій, сили супутнього гарантованого внутрішнього тиску p, і рівномірно розподіленого стискуючого напруження в кільцевому напрямі. Розрахунки повинні проводитися для усіх точок стінки оболонки. При розрахунках повздовжнього вигину стискуючі мембранні сили повинні розглядатися як позитивні, щоб уникнути широко поширеного використання від'ємних чисел.

prescribed fabrication tolerance quality of construction, 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. In buckling calculations, compressive membrane forces should be treated as positive to avoid the widespread use of negative numbers.

(2) Встановлені рівні якості допуску на виготовлення будівельних конструкцій оцінюються відповідно до таблиці 5.1.

(2) The prescribed fabrication tolerance quality of construction should be assessed as set out in table 5.1.

Таблиця 5.1 – Класи якості допуску на виготовлення
Table 5.1 – Fabrication tolerance quality classes

Якість допуску на виготовлення будівельних конструкцій Fabrication tolerance quality of construction	Параметр якості, Q Quality parameter, Q	Обмеження по класу надійності Reliability class restrictions
Стандартна Normal	16	Обов'язковий, якщо проект бункера розроблений згідно з правилами для класу наслідків 1 Compulsory when the silo is designed to Consequence Class 1 rules
Висока High	25	
Відмінна Excellent	40	Допускається тільки у випадках, якщо проект бункера розроблений згідно з правилами для класу наслідків 3 Only permitted when the silo is designed to Consequence Class 3 rules

Примітка: Вимоги до допусків на виготовлення відносно до класу наслідків якості допусків на виготовлення будівельних конструкцій викладені в стандартах EN 1993-1-6 і EN 1090.

NOTE: The tolerance requirements for the Fabrication Tolerance Consequence Quality Classes are set out in EN 1993-1-6 and EN 1090.

(3) Типовий недолік поширеності (діапазону) дефекту w_{ok} має бути прийнятий як:

(3) The representative imperfection amplitude w_{ok} should be taken as:

$$w_{ok} = \frac{t}{Q}\sqrt{\frac{r}{t}} \tag{5.14}$$

(4) Коефіцієнт зменшення пружної деформації за відсутності надмірного тиску α_0 повинен визначатися як:

(4) The unpressurised elastic imperfection reduction factor α_0 should be found as:

$$\alpha_0 = \frac{0,62}{1+1,91\psi\left(\frac{w_{ok}}{t}\right)^{1,44}} \tag{5.15}$$

де параметр неоднорідності напруження ψ – це одиниця у разі рівномірно розподіленого стиску в кільцевому напрямі, представлена в (8) для неоднорідного стиску.

where the stress non-uniformity parameter ψ is unity in the case of circumferentially uniform compression, but is given in paragraph (8) for non-uniform compression.

(5) Якщо у бункері створюється надмірний внутрішній тиск, коефіцієнт зменшення пружньої деформації α має бути прийнятий за найменшу з двох наступних величин: α_{pe} і α_{pp}, що визначаються відповідно до локального значення внутрішнього тиску p. У бункерах, спроектованих згідно з правилами для класу наслідків 1, значення коефіцієнта пружної деформації α не повинне перевищувати $\alpha = \alpha_0$.

(5) Where the silo is internally pressurised, the elastic imperfection reduction factor α should be taken as the smaller of the two following values: α_{pe} and α_{pp}, determined according to the local value of internal pressure p. For silos designed to Consequence Class 1 rules, the elastic imperfection factor α should not be taken as greater than $\alpha = \alpha_0$.

(6) Коефіцієнт зменшення пружної деформації при надмірному тиску α_{pe} повинен грунтуватися на найменшому значенні локального внутрішнього тиску (значення, наявність якого може бути гарантовано) в місці розташування точки, що підлягає оцінці, і при врахуванні осьового стиску:

(6) The elastic pressurised imperfection reduction factor α_{pe} should be based on the smallest local internal pressure (a value that can be guaranteed to be present) at the location of the point being assessed, and coexistent with the axial compression:

$$\alpha_{pe} = \alpha_0 + (1-\alpha_0)\left(\frac{\bar{p}_s}{\bar{p}_s + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_0}}}\right) \tag{5.16}$$

при:

with:

$$\bar{p}_s = \frac{p_s r}{t\sigma_{x,Rcr}} \tag{5.17}$$

де:

p_s мінімальне надійне розрахункове значення локального внутрішнього тиску (див. стандарт EN 1991-4);

$\sigma_{x,Rcr}$ критичне напруження повздовжнього вигину нижча межі пружності (див. вираз 5.28).

where:

p_s is the minimum reliable design value of local internal pressure (see EN 1991-4);

$\sigma_{x,Rcr}$ is the elastic critical buckling stress (see expression 5.28).

(7) Коефіцієнт зменшення пружної деформації при надмірному тиску α_{pp} повинен грунтуватися на найбільшому локальному внутрішньому тиску в місці розташування точки, що підлягає оцінці, і при врахуванні осьового стиску:

(7) The plastic pressurised imperfection reduction factor α_{pp} should be based on the largest local internal pressure at the location of the point being assessed, and coexistent with the axial compression:

$$\alpha_{pp} = \left\{1 - \left(\frac{\bar{p}_s}{\bar{\lambda}_x^2}\right)^2\right\}\left[1 - \frac{1}{1{,}12 + s^{3/2}}\right]\left[\frac{s^2 + 1{,}21\bar{\lambda}_x^2}{s(s+1)}\right] \tag{5.18}$$

при:

with:

$$\bar{p}_g = \frac{p_g}{\sigma_{x,Rcr}} \cdot \frac{r}{t} \tag{5.19}$$

$$s = \left(\frac{1}{400}\right)\left(\frac{r}{t}\right) \tag{5.20}$$

$$\bar{\lambda}_x^2 = \frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}} \tag{5.21}$$

де:

p_g – це найбільше розрахункове значення локального внутрішнього тиску (див. стандарт EN 1991-4).

where:

p_g is the largest design value of the local internal pressure (see EN 1991-4).

(8) Якщо осьове напруження стиску в кільцевому напрямі нерівномірно розподілене, ефект має бути представлений параметром неоднорідності напруження ψ, який визначається на основі лінійного розподілу пружного напруження, виходячи з діючого розподілу осьового напруження стиску. Розподіл осьового мембранного напруження стиску на обраному рівні в кільцевому напрямі повинен трансформуватися, як показано на рисунку 5.2. Розрахункове значення осьового мембранного напруження стиску $\sigma_{x,Ed}$ в точках найвищого напруження на цій осі координат позначається як $\sigma_{xo,Ed}$.

(8) Where the axial compression stress is non-uniform around the circumference, the effect should be represented by the stress non-uniformity parameter ψ, which should be determined from the linear elastic stress distribution of acting axial compressive stress distribution. The axial compressive membrane stress distribution around the circumference at the chosen level should be transformed as shown in figure 5.2. The design value of axial compressive membrane stress $\sigma_{x,Ed}$ at the most highly stressed point at this axial coordinate is denoted as $\sigma_{xo,Ed}$.

Розрахункове значення осьового мембранного напруження на стиску в другій точці на тій же осі координат, віддаленої від першої точки на відстань довжини кола

The design value of axial compressive membrane stress at a second point, at the same axial coordinate, but separated from the first point by the circumferential distance

$$y = r\Delta\theta = 4\sqrt{rt} \tag{5.22}$$

повинно бути прийнято як $\sigma_{x1,Ed}$

should be taken as $\sigma_{x1,Ed}$.

(9) Коли коефіцієнт напруження

(9) Where the stress ratio

$$s = \left(\frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \tag{5.23}$$

знаходиться в діапазоні $0,3 < s < 1,0$ вказане вище місце розташування другої точки є задовільним. Якщо значення s виходить за межі цього діапазону, слід вибрати альтернативне значення $r_{\Delta\theta}$ з тим, щоб значення s визначилося приблизно як $s = 0,5$. Потім потрібно продовжити наступні розрахунки з погодженою парою значень s і $\Delta\theta$.

lies in the range $0,3 < s < 1,0$ the above location for the second point is satisfactory. Where the value of s lies outside this range, an alternative value of $r_{\Delta\theta}$ should be chosen so that the value of s is found to be approximately $s = 0,5$. The following calculation should then proceed with a matched pair of values of s and $\Delta\theta$.

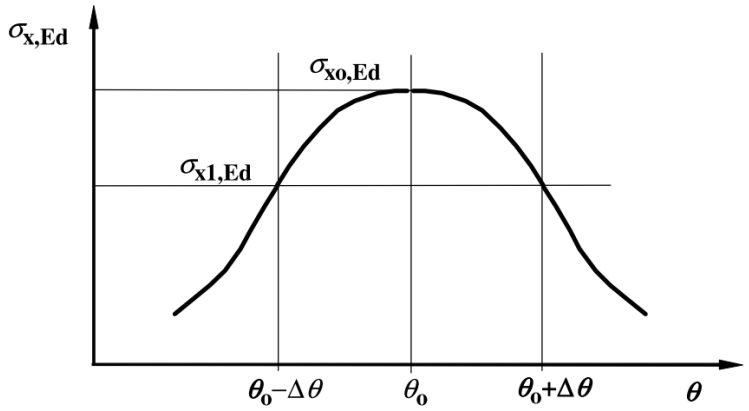


Рисунок 5.2 Представлення локального розподілу результуючої мембранного напруження в кільцевому напрямі

Figure 5.2 Representation of local distribution of axial membrane stress resultant around the circumference

(10) Еквівалент гармоніки j розподілу напруження повинен обчислюватися як:

(10) The equivalent harmonic j of the stress distribution should be obtained as:

$$j = 0,25\sqrt{\frac{r}{t}} \arccos\left(\frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \tag{5.24}$$

а параметр неоднорідності напруження ψ повинен визначатися як:

and the stress non-uniformity parameter ψ should be determined as:

$$\psi = \frac{1 - b_1 j}{1 + b_2 j} \tag{5.25}$$

при:

with:

$$b_1 = 0,5\sqrt{\frac{t}{r}} \tag{5.26}$$

$$b_2 = \frac{(1 - b_1)}{\psi_b} - 1 \tag{5.27}$$

тут ψ_b представляє значення параметра неоднорідності напруження в умовах загального вигину.

where ψ_b is the value of stress non-uniformity parameter under global bending conditions.

Примітка: Значення ψ_b може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\psi_b = 0,40$.

NOTE: The National Annex may choose the value of ψ_b. The value $\psi_b = 0,40$ is recommended.

(11) Еквівалент гармоніки j, при якій дефектність не знижується нижче опору, однорідному критичному прогину при стиску, може бути прийнятий за величину $j_\infty = 1/b_1$. Звідки знаходимо, що $j > j_\infty$, а значення j слід отримати за $j = j_\infty$.

(11) The equivalent harmonic j at which imperfections cause no reduction below the uniform compression critical buckling resistance may be taken as $j_\infty = 1/b_1$. Where it is found that $j > j_\infty$, the value of j should be taken as $j = j_\infty$.

(12) Коли використовується горизонтальне з'єднання внахлест, що викликає ексцентриситет осьової сили при проходженні через з'єднання, значення α, приведене вище в (4) – (7), повинне бути зменшено до α_L, якщо ексцентриситет серединної поверхні листів відносно один одному перевищує k_{1t}, а зміна товщини листа в місці з'єднання складає не більше k_{2t}, де t – товщина тоншого листа в з'єднанні. Якщо ексцентриситет складає менше цієї величини або зміна товщини листа більша, немає необхідності зменшувати значення α.

(12) Where a horizontal lap joint is used, causing eccentricity of the axial force in passing through the joint, the value of α given in paragraphs (4) to (7) above should be reduced to α_L if the eccentricity of the middle surface of the plates to one another exceeds k_{1t} and the change in plate thickness at the joint is not more than k_{2t}, where t is the thickness of the thinner plate at the joint. Where the eccentricity is smaller than this value, or the change in plate thickness is greater, no reduction need be made in the value of α.

Примітка 1: Значення α_L, k_1 і k_2 можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендуються значення α_L = 0,7α, k_1 = 0,5 і k_2 = 0,25, де α представлене як α_o, α_{pe} або α_{pp}, відповідно.

NOTE 1: The National Annex may choose the values of α_L, k_1 and k_2. The values α_L = 0,7α, k_1 = 0,5 and k_2 = 0,25 are recommended, where α is given by α_o, α_{pe} or α_{pp} as appropriate.

Примітка 2: Міцність на повздовжній згин знижується тільки нижче значення, яке в протилежному випадку застосовувалося б, якби нижня складова не мала достатньої товщини, щоб стримати формування слабкішого прогину, коли дефект утворюється безпосередньо над з'єднанням внахлест.

NOTE 2: The buckling strength is only reduced below the value that would otherwise apply if the lower course is not thick enough to restrain the formation of a weaker buckle when an imperfection occurs immediately above the lap joint.

(13) Критичне напруження при повздовжньому вигині ізотропної стінки розраховується за формулою:

(13) The critical buckling stress of the isotropic wall should be calculated as:

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{E}{\sqrt{3\left(1-\nu^2\right)}} \cdot \frac{t}{r} = 0,605E\frac{t}{r} \qquad (5.28)$$

(14) Характеристичне напруження при повздовжньому вигині визначається за допомогою відповідного значення α, вказаного в (4), (5), (6), (7) і (8), таким чином:

(14) The characteristic buckling stress should be found, using the appropriate value of α from paragraphs (4), (5), (6), (7) and (8) above as:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x f_y \qquad (5.29)$$

Примітка: Спеціальні умовні позначення, в яких використовуються σ_{Rk} і σ_{Rd} для характеристичного і розрахункового опорів повздовжньому вигину, відповідають приписам стандарту EN 1993-1-6 для оболонкових конструкцій і відрізняються від

NOTE: The special convention using σ_{Rk} and σ_{Rd} for characteristic and design buckling resistances follows that of prEN1993-1-6 for shell structures and differs from that detailed in EN1993-1-1.

позначень, детально розглянутих в стандарті EN 1993-1-1.

(15) Коефіцієнт зменшення повздовжнього вигину χ_x повинен визначатися як функція відносної міри зменшення товщини оболонки $\bar{\lambda}_x$, виходячи з:

(15) The buckling reduction factor χ_x should be determined as a function of the relative slenderness of the shell $\bar{\lambda}_x$ from:

$$\chi_x = 1 \qquad \text{коли when} \qquad \bar{\lambda}_x \le \bar{\lambda}_0 \tag{5.30}$$

$$\chi_x = 1 - \beta\left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0}\right)^{\eta} \qquad \text{коли when} \qquad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \tag{5.31}$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \qquad \text{коли when} \qquad \bar{\lambda}_p \le \bar{\lambda}_x \tag{5.32}$$

при: with:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rcr}}} \tag{5.33}$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2 \tag{5.34}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\beta}} \tag{5.35}$$

де α вибирається як величина α_o, α_{pe}, α_{pp} або α_L, відповідно.

where α is chosen as the value of α_o, α_{pe}, α_{pp} or α_L as appropriate.

Примітка: Значення β і η можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендуються значення β = 0,60 і η = 1,0.

NOTE: The National Annex may choose the values of β and η. The values β = 0,60 and η = 1,0 are recommended.

(16) Розрахункове мембранне напруження при повздовжньому вигині визначається за формулою:

(16) The design buckling membrane stress should be determined as:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \tag{5.36}$$

де величина γ_{M1} представлена в 2.9.2.

where γ_{M1} is given in 2.9.2.

(17) В усіх точках конструкції результуючі розрахункового напруження повинні задовольняти умові:

(17) At every point in the structure the design stress resultants should satisfy the condition:

$$n_{x,Ed} \le t\, \sigma_{x,Rd} \tag{5.37}$$

(18) Якщо в стінці є з'єднання внахлест, що задовольняє умовам, вказаним в (12), вимір максимального допустимого дефекту не обов'язково повинен робитися поперек самого з'єднання внахлест.

(18) Where the wall contains a lap joint satisfying the conditions defined in (12), the measurement of the maximum permissible measurable imperfection need not be taken across the lap joint itself.

(19) Проектування оболонки, стійкої до повздовжнього вигину під впливом осьового стиску над локальною опорою, в зоні кронштейна (тобто для підтримки портального завантажувального пристрою конвеєра) і поблизу отвору повинно виконуватися відповідно до 5.6.

(19) The design of the shell against buckling under axial compression above a local support, near a bracket (e.g. to support a conveyor gantry), and near an opening should be undertaken as stipulated in 5.6.

5.3.2.5 *Повздовжній згин під впливом зовнішнього тиску, часткової внутрішньої розрідженості і вітру*

5.3.2.5 *Buckling under external pressure, internal partial vacuum and wind*

(1) Оцінка повздовжнього вигину повинна робитися відповідно до вимог стандарту EN 1993-1-6, яка може бути виконана за допомогою наступних оцінок розрахункового опору.

(1) The buckling assessment should be carried out using EN 1993-1-6, but these may be met using the following assessments of the design resistance.

(2) Нижня кромка циліндричної оболонки має бути надійно закріплена анкерами, щоб протистояти вертикальному зміщенню; див. 5.4.7.

(2) The lower edge of the cylindrical shell should be effectively anchored to resist vertical displacements, see 5.4.7.

(3) Під впливом вітру або часткової розрідженості стінка бункера повинна розділятися на сегменти, що знаходяться між кільцями жорсткості або ділянками, де змінюються товщина листа чи граничні умови.

(3) Under wind or partial vacuum, the silo wall should be broken into segments lying between stiffening rings or changes of plate thickness or boundary conditions.

.

(4) Оцінка повздовжнього вигину повинна робитися в кожному сегменті або групі сегментів, де може утворитися потенційна випуклість, включаючи найтонші сегменти і поступово по мірі збільшення товщини додаючи інші сегменти. Найнижчий розрахунковий тиск при повздовжньому вигині визначається, виходячи з цих альтернативних оцінок.

(4) A buckling assessment should be carried out on each segment or potential group of segments where a buckle could form, including the thinnest segment and adding others progressively. The lowest design buckling pressure should be found from these alternative assessments.

(5) Критичний зовнішній тиск на ізотропну стінку при повздовжньому вигині повинен визначатися як:

(5) The critical buckling external pressure for an isotropic wall should be found as:

$$p_{n,Rcru} = 0,92 C_b C_w E \left(\frac{r}{l}\right)\left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} \qquad (5.38)$$

де:

t товщина найтоншої частини стінки;

l висота між кільцями жорсткості або границями;

where:

t is the thickness of the thinnest part of the wall;

l is the height between stiffening rings or boundaries;

C_b коефіцієнт повздовжнього вигину під впливом зовнішнього тиску;

C_w коефіцієнт розподілу вітрового тиску.

(6) Параметр C_b повинен оцінюватися на підставі стану верхньої кромки відповідно таблиці 5.2.

C_b is the external pressure buckling coefficient;

C_w is the wind pressure distribution coefficient.

(6) The parameter C_b should be evaluated based on the condition at the upper edge according to table 5.2.

Таблиця 5.2 –Значення параметра повздовжнього вигину C_b під зовнішнім тиском

Table 5.2 – Values of external pressure buckling parameter C_b

Стан верхньої кромки Upper edge condition	Дах конструктивно цілком пов'язаний із стіною (безперервно) Roof integrally structurally connected to wall (continuous)	Кільце верхньої кромки задовольняє 5.3.2.5 (12) – (14) Upper edge ring satisfying 5.3.2.5 (12) – (14)	Верхня кромка не задовольняє 5.3.2.5 (12) – 14) Upper edge not satisfying 5.3.2.5 (12) – (14)
C_b	1,0	1,0	0,6

(7) Якщо бункер розташований в щільній групі бункерів, коефіцієнт розподілу вітрового тиску (пов'язаний з тиском на навітряну сторону бункера) слід прийняти за C_w = 1,0.

(7) Where the silo is in a close-spaced silo group, the wind pressure distribution coefficient (relating to the pressure at the windward generator of the silo) should be taken as C_w= 1,0.

(8) Якщо бункер розташований окремо і під впливом тільки вітрового навантаження, коефіцієнт розподілу вітрового тиску (пов'язаний з тиском на навітряну сторону бункера) слід прийняти за найбільшу величину з:

(8) Where the silo is isolated and subject only to wind loading, the wind pressure distribution coefficient (relating to the pressure at the windward generator of the silo) should be taken as the greater of:

$$C_w = \frac{2,2}{\left(1+0,1\sqrt{C_b \frac{r}{l}\sqrt{\frac{r}{l}}}\right)} \tag{5.39}$$

$$C_w = 1,0 \tag{5.40}$$

(9) Якщо бункер розташований окремо і схильний до комбінованої дії вітрового навантаження і внутрішньої розрідженості, значення C_w повинне визначатися як лінійна комбінація 1,0 і розрахункового значення, приведеного в (8) відповідно до пропорційного співвідношення зовнішнього тиску, що виникає з кожного джерела.

(9) Where the silo is isolated and a combination of wind loading and internal vacuum exist, the value of C_w should be determined as a linear combination of 1,0 and the calculated value given in (8), according to the proportions of the external pressure that arise from each source.

(10) Максимальний розрахунковий зовнішній тиск (навітряне джерело енергії) під впливом вітру і/або часткового розрідження повинен оцінюватися як:

(10) The design maximum external pressure (windward generator) under wind and/or partial vacuum should be assessed as:

$$p_{n,Rd} = \alpha_n p_{n,Rcru} / \gamma_{M1} \tag{5.41}$$

де α_n - коефіцієнт зменшення дефектності внаслідок пластичного повздовжнього

Where α_n is the elastic buckling imperfection reduction factor and γ_{M1} is

вигину, а значення γ_{M1} приведене в 2.9.2.

Примітка: Значення α_n може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\alpha_n = 0,5$.

given in 2.9.2.

NOTE: The National Annex may choose the value of α_n. The value $\alpha_n = 0,5$ is recommended.

(11) Перевірка опору повинна задовольняти наступній умові:

(11) The resistance check should satisfy the condition:

$$p_{n,Ed} \leq p_{n,Rd} \tag{5.42}$$

де: $p_{n,Ed}$ розрахункове значення максимального зовнішнього тиску вітру і/або часткового розрідження.

where: $p_{n,Ed}$ is the design value of the maximum external pressure under wind and/or partial vacuum.

(12) У верхній кромці циліндра, який по усім розрахункам ефективно зв'язаний кільцем, яке повинно задовольняти вимогам до міцності і жорсткості. Якщо провести дослідження більш ретельно за допомогою чисельного аналізу, розрахункове значення кільцевої сили і кільцевого згинаючого моменту відносно вертикальної осі в кільці слід прийняти як:

(12) For the upper edge of a cylinder to be treated as effectively restrained by a ring, the ring should satisfy both a strength and a stiffness requirement. Unless a more thorough assessment is made using numerical analysis, the design value of the circumferential (hoop) force and circumferential bending moment about a vertical axis in the ring should be taken as:

$$N_{\theta,Ed} = 0,5\, r\, L\, p_{n,Ed} \tag{5.43}$$

$$M_{\theta,Ed} = M_{\theta,Edo} + M_{\theta,Edw} \tag{5.44}$$

з (with):

$$M_{\theta,Edo} = 0,0033 p_{nS1} r^2 L \left(\frac{p_{nS1}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \tag{5.45}$$

$$M_{\theta,Edw} = 0,17 p_{n,Edw} r^2 L \left(\frac{p_{n,Edu}}{p_{nS1} - p_{n,Edu}} \right) \tag{5.46}$$

$$p_{nS1} = \frac{6EI_z}{r^3 L} \tag{5.47}$$

де:

$p_{n,Edu}$ розрахункове значення однорідного компонента зовнішнього тиску вітру і/або часткової розрідженості;

$p_{n,Edw}$ розрахункове значення тиску в критичній точці вітрового потоку;

p_{nS1} еталонний тиск для розрахунку кільцевого згинаючого моменту;

$M_{\theta,Edo}$ розрахункове значення згинаючого моменту асоціюється з відхиленням від округлості;

$M_{\theta,Edw}$ розрахункове значення згинаючого

where:

$p_{n,Edu}$ is the design value of the uniform component of the external pressure under wind and/or partial vacuum;

$p_{n,Edw}$ is the design value of the stagnation point pressure under wind;

p_{nS1} is the reference pressure for ring bending moment evaluations;

$M_{\theta,Edo}$ is the design value of the bending moment associated with out-of-roundness;

$M_{\theta,Edw}$

моменту під впливом вітру;
I_z момент інерції площі кільця при вигині в кільцевому напрямі;

L загальна висота стінки оболонки;

t товщина найтоншого поясу.

(13) Якщо конструкція кільця верхньої кромки циліндра виготовлена методом холодної формовки, значення $M_{\theta,Edo}$ має бути збільшене на 15% відносно того значення, яке представлене виразом 5.45.

(14) Згинаюча жорсткість EI_z кільця верхньої кромки циліндра відносно його вертикальної осі (при вигині в кільцевому напрямі) має бути вища за найбільшу величину з:

I_z is the second moment of area of the ring for circumferential bending;

L is the total height of the shell wall;

t is the thickness of the thinnest strake.

(13) Where the ring at the upper edge of a cylinder is made as a cold formed construction, the value of $M_{\theta,Edo}$ should be increased by 15% above that given by expression 5.45.

(14) The flexural rigidity EI_z of a ring at the upper edge of the cylinder about its vertical axis (circumferential bending) should exceed the larger of:

$$EI_{z,min} = k_1 E\, Lt^3 \tag{5.48}$$

$$EI_{z,\min} = 0,08 C_w E r t^3 \sqrt{(r/t)} \tag{5.49}$$

де:
C_w коефіцієнт розподілу тиску вітру, представлений в (7) і (8).

Примітка: Значення k_1 може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_1 = 0,1$

where
C_w is the wind pressure distribution coefficient given in (7) or (8).

NOTE: The National Annex may choose the value of k_1.The value $k_1 = 0,1$ is recommended.

5.3.2.6 *Мембранний зсув*

(1) Якщо основна частина стінки бункера схильна до зсувного навантаження (як при ексцентричному наповненні, сейсмічному навантаженні тощо), мембранний опір втраті стійкості при зсуві повинен бути прийнятий за таку ж величину, як при крученні оболонки на кожному горизонтальному рівні. У проекті можуть бути взяті до уваги осьові коливання при зсуві.

5.3.2.6 *Membrane shear*

(1) Where a major part of the silo wall is subjected to shear loading (as with eccentric filling, earthquake loading etc.), the membrane shear buckling resistance should be taken as that for a shell in torsion at each horizontal level. The axial variation in shear may be taken into account in design.

(2) Критичне напруження зсуву при втраті стійкості ізотропної стінки повинно розраховуватись як:

(2) The critical shear buckling stress of the isotropic wall should be calculated as:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 0,75E\left(\frac{r}{l}\right)^{0,5}\left(\frac{t}{r}\right)^{1,25} \tag{5.50}$$

де:
t товщина стінки в найтоншому місці;

where:
t is the thickness of the thinnest part of the wall;

l висота між ребрами жорсткості або межами.

(3) Кільце жорсткості, яке потрібне як межа зони втрати стійкості при зсуві, повинне мати згинну жорсткість EI_z по осі вигину уздовж кола; її величина має бути не менше, ніж:

l is the height between stiffening rings or boundaries.

(3) A stiffening ring which is required as the boundary for a shear buckling zone should have a flexural rigidity EI_z about the axis for bending around the circumference not less than:

$$EI_{z,\min} = k_s E t^3 \sqrt{rl} \tag{5.51}$$

де прийняті такі ж значення l і t як ті, що застосовувалися в (2) в найкритичнішому стані втрати стійкості.

where the values of l and t are taken as the same as those used in the most critical buckling mode in paragraph (2).

Примітка: Значення k_s може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення k_s = 0,10.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_s. The value k_s = 0,10 is recommended.

(4) Якщо зсув τ має лінійні варіації по висоті конструкції, опір критичному зсуву при втраті стійкості в найвищій точці зсуву може бути збільшено до:

(4) Where the shear τ varies linearly with height in the structure, the critical shear buckling resistance at the point of highest shear may be increased to:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 1,4E\left(\frac{r}{l_0}\right)^{0,5}\left(\frac{t}{r}\right)^{1,25} \tag{5.52}$$

де l_o визначається, виходячи з:

with l_o determined from:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta,Ed,\max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dx}\right)} \tag{5.53}$$

де

$\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dx}\right)$ це усереднене значення швидкості зміни осьового зсуву по висоті у зоні зсуву;

$\tau_{x\theta,Ed,\max}$ це пікове значення напруження зсуву. Якщо довжина l_o перевищує висоту конструкції, це правило не слід застосовувати, але оболонка повинна розглядатися як така, що підлягає однорідному мембранному зсуву, представленому в (2).

where

$\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dx}\right)$ is the axial rate of change of shear with height averaged over the zone and

$\tau_{x\theta,Ed,\max}$ is the peak value of shear stress. Where the length l_o exceeds the height of the structure, this rule should not be used, but the shell should be treated as subject to uniform membrane shear set out in (2).

(5) Якщо локальні напруження зсуву викликані локальними опорами і осьовими ребрами жорсткості, опір критичному зсуву при втраті стійкості, виражений в показниках локального значення перерозподілу зсуву між осьовим ребром жорсткості і оболонкою, може бути визначено в точці наивищого зсуву за допомогою виразу:

(5) Where local shear stresses are induced by local supports and load-bearing axial stiffeners, the critical shear buckling resistance, assessed in terms of the local value of the shear transfer between the axial stiffener and the shell may be evaluated at the point of highest shear as:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 1,4E\left(\frac{r}{l_0}\right)^{0,5}\left(\frac{t}{r}\right)^{1,25} \quad (5.54)$$

у якому l_o визначається як:

in which l_o is found as:

$$l_0 = \frac{\tau_{x\theta,Ed,\max}}{\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dx}\right)} \quad (5.55)$$

де

$\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dy}\right)$ це усереднене значення швидкості зміни зсуву в кільцевому напрямку по мірі віддалення від ребра жорсткості в зоні зсуву;

$\tau_{x\theta,Ed,\max}$ це пікове значення напруження зсуву.

where

$\left(\frac{d\tau_{x\theta,Ed}}{dy}\right)$ is the circumferential rate of change of shear with distance from the stiffener averaged over the zone, and

$\tau_{x\theta,Ed,\max}$ is the peak value of shear stress.

(6) Розрахункове напруження при повздовжньому вигині повинне визначатися як найменша із наступних величин:

(6) The design buckling stress should be determined as the lesser of:

$$\tau_{x\theta,Rd} = \alpha_\tau \tau_{x\theta,Rcr}/\gamma_{M1} \quad (5.56)$$

і

and

$$\tau_{x\theta,Rd} = 0,57\, f_y/\gamma_{M1} \quad (5.57)$$

де:

α_τ коефіцієнт зменшення формозміни при пружній втраті стійкості;

γ_{M1} частковий коефіцієнт, приведений в 2.9.2.

where:

α_τ is the elastic buckling imperfection reduction factor;

γ_{M1} is the partial factor given in 2.9.2.

Примітка: Значення α_τ може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\alpha_\tau = 0,80$.

NOTE: The National Annex may choose the value of α_τ. The value $\alpha_\tau = 0,80$ is recommended.

(7) В усіх точках конструкції результуючі розрахункового напруження повинні задовольняти наступній умові:

(7) At every point in the structure the design stress resultants should satisfy the condition:

$$n_{x\theta,Ed} \le t\, \tau_{x\theta,Rd} \quad . \quad 58)$$

5.3.2.7 *Взаємодія між меридіональним стиском, стиском в кільцевому напрямі і мембранним зсувом*

5.3.2.7 *nteractions between meridional compression, circumferential compression and embrane shear*

(1) Якщо стан напруження в стінці бункера містить суттеву долю складових, окрім мембранного напруження стиску або напруження зсуву, повинні виконуватися положення стандарту EN 1993-1-6.

(1) here the stress state in the silo wall contains significant components of more than one compressive membrane stress or shear stress, the provisions of EN 1993-1-6 should be followed.

(2) Вимоги до такої взаємодії можна ігнорувати, якщо усі, окрім однієї, складової розрахункового напруження мають величину менше 20% що відповідає розрахунковому опору повздовжнього вигину.

(2) he requirements of this interaction may be ignored if all but one of the design stress components are less than 20% of the corresponding buckling design resistance.

5.3.2. ***Втома, LS4***

5.3.2. ***Fatigue, LS4***

(1) У бункерах для класу наслідків 3 повинні виконуватися положення стандарту EN 1993-1-6.

(1) or silos in Consequence Class 3, the provisions of EN 1993-1-6 should be followed.

(2) У бункерах для класу наслідків 2, якщо розрахунковий термін експлуатації конструкції превищує N_f циклів наповнення і розвантаження, повинна проводитися перевірка на втому.

(2) or silos in Consequence Class 2, a fatigue check should be carried out if the design life of the structure involves more than N_f ycles of filling and discharge.

Примітка: Значення N_f може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення N_f = 10 000.

NOTE: The National Annex may choose the value of N_f.The value N_f = 10 000 is recommended.

5.3.2.9 *Циклічна пластичність, LS2*

5.3.2.9 *Cyclic plasticity, LS2*

(1) У бункерах для класу наслідків 3 повинні виконуватися положення стандарту EN 1993-1-6. Перевірка на відмову в умовах циклічної пластичності повинна проводитися в точках порушення неперервності, поблизу локальних кільцевих ребер жорсткості і оснащення.

(1) or silos in Consequence Class 3, the provisions of EN 1993-1-6 should be followed. A check forfailure under cyclic plasticity should be made at discontinuities, near local ring stiffeners and near attachments.

(2) У бункерах інших класів наслідків ця перевірка може не проводитися.

(2) Silos in other Consequence Classes, this check may be omitted.

5.3.3 ***Ізотропні стінки з вертикальними ребрами жорсткості***

5.3.3 ***Isotropic walls with vertical stiffeners***

5.3.3.1 *Загальні положення*

5.3.3.1 *General*

(1) Якщо ізотропна стінка укріплена за допомогою вертикальних ребер жорсткості (повздовжніх балок), при оцінці напруження стиску у вертикальному напрямі повинен враховуватися ефект сумісності укороченої стінки внаслідок внутрішнього тиску як в стінці, так і в ребрах жорсткості.

(1) Where an isotropic wall is stiffened by vertical (stringer) stiffeners, the effect of compatibility of the shortening of the wall due to internal pressure should be taken into account in assessing the vertical compressive stress in both the wall and the stiffeners.

(2) Результуючі розрахункового напруження, значення опору і контрольні дані повинні визначатися згідно 5.3.2, але

(2) The design stress resultants, resistances and checks should be carried out as in 5.3.2, but including the additional provisions set out

з урахуванням вказаних тут додаткових положень.

here.

5.3.3.2 *Граничний стан пластичності*

5.3.3.2 *Plastic limit state*

(1) Опір розриву вертикального шва повинен визначатися як в ізотропній оболонці (див. 5.3.2).

(1) The resistance against rupture on a vertical seam should be determined as for an isotropic shell (5.3.2).

(2) Якщо конструктивний сполучний елемент включає ребро жорсткості, як частину засобів перенесення напружень в кільцевому напрямі, ефект напруження ребра жорсткості повинен враховуватись при оцінці сили напруження в ребрі і його сприйнятливості до розриву під впливом напруження в кільцевому напрямі.

(2) Where 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.

5.3.3.3 *Повздовжній згин під впливом осьового стиску*

5.3.3.3 *Buckling under axial compression*

(1) Стінка має бути розрахована на такий же критерій повздовжнього вигину під дією осьового стиску як стінка без ребер жорсткості, хіба що інтервал між ребрами жорсткості буде менше $2\sqrt{rt}$, де t - це локальна товщина стінки.

(1) The wall should be designed for the same axial compression buckling criteria as the unstiffened wall unless the stiffeners are at closer spacings than $2\sqrt{rt}$, where t is the local thickness of the wall.

(2) Якщо вертикальні ребра жорсткості розташовані з інтервалом меньшим $2\sqrt{rt}$, опір повздовжньому вигину усієї стінки повинен оцінюватися або виходячи з припущення, що використовується приведений вище (1), або за допомогою загального аналізу процедур, передбачених в стандарті EN 1993-1-6.

(2) Where vertical stiffeners are placed at closer spacings than $2\sqrt{rt}$, the buckling resistance of the complete wall should be assessed either by assuming that paragraph (1) above applies, or by using the global analysis procedures of EN 1993-1-6.

(3) Міцність самих ребер жорсткості на повздовжній згин при осьовому стиску повинна оцінюватись з урахуванням положень стандартів EN 993-1-1 і EN 993-1-3 (сталеві елементи холодної прокатки) або стандарта EN 993-1-5, відповідно.

(3) The axial compression buckling strength of the stiffeners themselves should be evaluated using the provisions of EN 1993-1-1 or EN 1993-1-3 (cold formed steel members) or EN 1993-1-5 as appropriate.

(4) Також повинен враховуватися ексцентриситет ребра жорсткості відносно стінки оболонки.

(4) The eccentricity of the stiffener to the shell wall should be taken into account.

5.3.3.4 *Повздовжній згин під впливом зовнішнього тиску, часткового розрідження або вітру*

(1) Стінка має бути розрахована на такий же критерій повздовжнього вигину під дією зовнішнього тиску, як стінка без ребер жорсткості, хіба що знадобляться ретельніші розрахунки.

(2) Якщо знадобляться ретельніші розрахунки, вертикальні ребра жорсткості можуть бути розглянуті як розподілені по ортотропній стінці, а оцінка напруження повздовжнього вигину може виконуватися на підставі положень 5.3.4.5 при $C_\upsilon = C_\theta = Et$ і $C_{\upsilon\theta} = 0{,}38\,Et$.

5.3.3.4 *Buckling under external pressure, partial vacuum or wind*

(1) The wall should be designed for the same external pressure buckling criteria as the unstiffened wall unless a more rigorous calculation is necessary.

(2) Where a more rigorous calculation is needed, the vertical stiffeners may be smeared to give an orthotropic wall, and the buckling stress assessment carried out using the provisions of 5.3.4.5, with $C_\upsilon = C_\theta = Et$ and $C_{\upsilon\theta} = 0{,}38\,Et$.□

5.3.3.5 *Мембранний зсув*

(1) Якщо основна частина стінки бункера піддається навантаженню зсуву (як при эксцентричному наповненні, сейсмічному навантаженні тощо), мембранний опір втраті стійкості при зсуві повинен бути прийнятий за таку ж величину, як при крученні оболонки, і повинен визначатися так само, як для ізотропної стінки без ребер жорсткості (див. 5.3.2.6). Але розрахунковий опір може бути збільшений, якщо взяти до уваги вплив ребер жорсткості. Еквівалентна довжина l оболонки при зсуві може бути прийнята за найменшу висоту між кільцями жорсткості, чи граничними межами, або за подвійну відстань по горизонталі між вертикальними ребрами жорсткості за умови, що кожне ребро жорсткості має згинну жорсткість EI_y при вигині у вертикальному напрямі (відносно кільцевої осі) більшу ніж:

5.3.3.5 *Membrane shear*

(1) Where a major part of the silo 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 5.3.2.6), but the calculated resistance may be increased if account is taken of the effect 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 horizontal separation of the vertical stiffeners, provided that each stiffener has a flexural rigidity EI_y for bending in the vertical direction (about a circumferential axis) greater than:

$$EI_{y,\min} = k_s E t^3 \sqrt{rl} \tag{5.59}$$

де значення l і t беруться як такі ж, що застосовуються в найкритичнішому стані повздовжнього вигину.

where the values of l and tare t aken as the same as those used in the most critical buckling mode.

Примітка: Значення k_s може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_s = 0{,}10$.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_s. The value $k_s = 0{,}10$ is recommended.

(2) Якщо відособлене ребро жорсткості різко обривається у напрямі верхньої частини оболонки, силу в оболонці слід розглядати як рівномірно перерозподілену в оболонці по довжині, що не перевищує $k_t\sqrt{rt}$.

Примітка: Значення k_t може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_t = 4{,}0$.

(3) Якщо ребра жорсткості обриваються, як вказано в пункті (2), або використовуються для передачі локальних сил в оболонку, оціночний опір передачі зсуву між ребром жорсткості і оболонкою не повинен перевищувати значення, приведене в 5.3.2.6 для змінного лінійного зсуву.

5.3.4 Горизонтальні гофровані стінки

5.3.4.1 *Загальні положення*

(1) Усі розрахунки повинні виконуватися з товщиною, що виключає покриття і допуски.

(2) Мінімальна товщина сталевої основи гофрованої листової обшивки стінки повинна відповідати вимогам стандарту EN 1993-1-3. У конструкціях на болтових з'єднаннях розмір болта має бути не менше М8.

(3) Якщо циліндрична стінка виготовлена з гофрованого листа з горизонтальними гофрами і вертикальними ребрами жорсткості прикріпленими до стінки, гофрована стінка повинна розглядатися як така, що несе вертикальне навантаження, чи стінка вважатиметься ортотропною оболонкою; див. 5.3.4.3.3.

(4) Особливу увагу слід приділити тому, щоб ребра жорсткості були безперервно стійкі по відношенню до вигину в меридіальній площині перепендикулярній стінці, оскільки згинна неперервність ребра жорсткості надзвичайно важлива для створення опору повздовжньому вигину під впливом

(2) Where 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 $k_t\sqrt{rt}$

NOTE: The National Annex may choose the value of k_t. The value $k_t = 4{,}0$ is recommended.

(3) Where the stiffeners are terminated as in (2), 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 5.3.2.6 for linearly varying shear.

5.3.4 Horizontally corrugated walls

5.3.4.1 *General*

(1) All calculations should be carried out with thicknesses exclusive of coatings and tolerances.

(2) The minimum steel core thickness for the corrugated sheeting of the wall should meet the requirements of EN 1993-1-3. In bolted construction, the bolt size should not be less than M8.

(3) Where the cylindrical wall is fabricated from corrugated sheeting with the corrugations running horizontally and vertical stiffeners are attached to the wall, the corrugated wall should be assumed to carry no vertical forces unless the wall is treated as an orthotropic shell, see 5.3.4.3.3.

(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 under wind or external pressure as well as when the stored solids flow.

вітру або зовнішнього тиску, а також від дії сипучих твердих матеріалів, що зберігаються.

(5) Якщо стінка укріплена вертикальними ребрами жорсткості, кріплення між листами обшивки і ребрами жорсткості має бути співвимірним, щоб гарантувати перерозподіл навантаження на зсув (фрикційного зусилля) в твердих матеріалах, що зберігаються, з кожного сегменту стінної обшивки на ребра жорсткості. Товщина листової обшивки має бути підібрана так, щоб виключити локальний розрив кріплення з урахуванням зниженої несучої здатності кріпильних елементів у гофрованій листовій обшивці.

(5) Where the wall is stiffened with vertical stiffeners, the fasteners between the sheeting and stiffeners should be proportioned to ensure that the distributed shear loading from stored solids (frictional traction) 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) Результуючі розрахункового напруження, опори і контрольні дані повинні визначатися згідно 5.3.2, але з урахуванням додаткових положень, викладених вище в пунктах (1) - (5).

(6) The design stress resultants, resistances and checks should be carried out as in 5.3.2, but including the additional provisions set out in (1) to (5) above.

Примітка 1: детальніша інформація про проектування гофрованих оболонок бункерів є в довідкових даних, приведених в додатку D.

NOTE 1: More detailed information on the design of corrugated silos is available in the references given in Annex D.

Примітка 2: Загальні заходи по підвищенню жорсткості стінки показані на рисунку 5.3.

NOTE 2: Common arrangements for stiffening the wall are shown in figure 5.3.

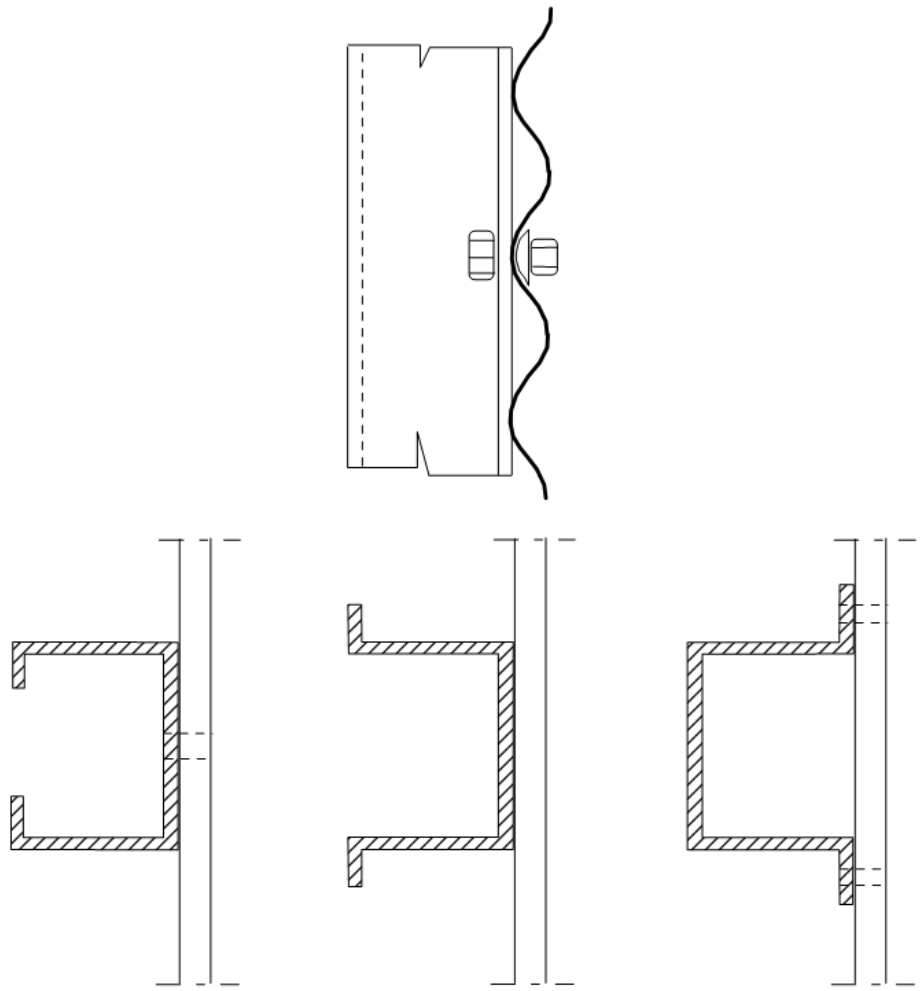


Рисунок 5.3 Загальна схема розташування вертикальних ребер жорсткості на оболонках з горизонтальними гофрами

Figure 5.3 Common arrangements for vertical stiffeners on horizontally corrugated shells

5.3.4.2 *Граничний стан пластичності*

(1) Кріпильні болти міжпанельних з'єднань повинні задовольняти вимоги EN 1993-1-8.

(2) Деталь з'єднання між панелями повинна відповідати положенням EN 1993-1-3 для з'єднань, що знаходяться в станах розтягу або стиску.

(3) Інтервал між кріпильними елементами по периметру кола не повинен перевищувати 3° кола.

Примітка: Деталь типового болтового з'єднання панелі показана на рисунку 5.4.

5.3.4.2 *Plastic limit state*

(1) Bolts for fastenings between panels should satisfy the requirements of EN 1993-1-8.

(2) The joint detail between panels should comply with the provisions of EN 1993-1-3 for connections in tension or compression.

(3) The spacing between fasteners around the circumference should not exceed 3° of the circumference.

NOTE: A typical bolt arrangement detail for a panel is shown in figure 5.4.

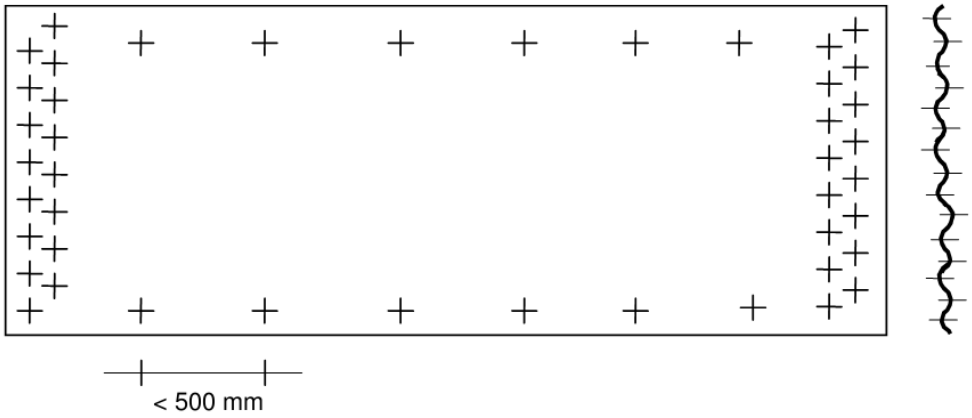


Рисунок 5.4 Типове болтове з'єднання гофрованої панелі бункера

Figure 5.4 Typical bolt arrangement for a panel of a corrugated silo

(4) Якщо в стінка має наскрізні отвори для люків, дверей, шнеків транспортера і інших пристроїв, в цих місцях повинен застосовуватися гофрований лист більшої товщини, щоб гарантувати, що коефіцієнти концентрації місцевого напруження, що асоціюються з невідповідністю жорст-кості, не призведуть до локального розриву.

(4) Where 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.

5.3.4.3 *Повздовжній згин під впливом осьового стиску*

5.3.4.3 Buckling under axial compression

5.3.4.3.1 *Загальні положення*

5.3.4.3.1 *General*

(1) Розрахунковий опір при осьовому стиску повинен визначатися в усіх точках оболонки за допомогою встановлених допусків на якість виготовлення будівельних конструкцій, сили супутнього гарантованого внутрішнього тиску p і однорідності стискуючого напруження в кільцевому напрямі. Проект повинен враховувати кожну точку на стінці оболонки.

(1) Under axial compression, the design resistance should be determined at every point in the shell using the prescribed fabrication tolerance quality of construction, 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.

(2) Якщо стінку з горизонтальним гофром зміцнити вертикальними ребрами жорсткості, розрахунок повздовжнього вигину стінки повинен виконуватися згідно з одним з двох альтернативних методів:

(2) If the horizontally corrugated wall is stiffened with vertical stiffeners, the buckling design of the wall should be carried out using one of two alternative methods:

а) розрахунок повздовжнього вигину еквівалентної ортотропної оболонки (згідно 5.3.4.3.3), якщо відстань між ребрами жорсткості по горизонталі

a) buckling of the equivalent orthotropic shell (following 5.3.4.3.3) if the horizontal distance between stiffeners satisfies 5.3.4.3.3 (2);

задовольняє вимогам 5.3.4.3.3 (2);

б) розрахунок повздовжнього вигину окремих ребер жорсткості (передбачається, що гофрована стінка не несе осьове навантаження, але забезпечує опір ребрам жорсткості) і дотримання вимог 5.3.4.3.4, якщо відстань між ребрами жорсткості по горизонталі не задовольняє вимогам 5.3.4.3.3(2).

b) buckling of the individual stiffeners (corrugated wall assumed to carry no axial force, but providing restraint to the stiffeners) and following 5.3.4.3.4 if the horizontal distance between stiffeners does not satisfy 5.3.4.3.3(2).

5.3.4.3.2 *Стінка без ребер жорсткості*

(1) Якщо гофрована оболонка не має вертикальних ребер жорсткості, характеристичне значення локального опору пластичному повздовжньому вигину повинне визначатися як найбільше з:

5.3.4.3.2 *Unstiffened wall*

(1) If the corrugated shell has no vertical stiffeners, the characteristic value of local plastic buckling resistance should be determined as the greater of:

$$n_{x,Rk} = \frac{t^2 f_y}{2d} \tag{5.60}$$

$$n_{x,Rk} = R_\varphi \frac{t}{r} f_y \tag{5.61}$$

де:
t товщина листа;
d відстань між гребенем і западиною;
R_υ локальна кривизна гофра (див. рисунок 4.2);
r радіус циліндра.

where:
t is the sheet thickness;
d is the crest to trough amplitude;
R_υ is the local curvature of the corrugation (see figure 4.2);
r is the cylinder radius.

Локальний опір пластичному повздовжньому вигину $n_{x,Rk}$ повинен сприйматися як незалежний від величини внутрішнього тиску p_n.

Thelocal plastic buckling resistance $n_{x,Rk}$ should be taken as independent of the value of internal pressure p_n.

Примітка: Локальний опір пластичному повздовжньому вигину – це опір руйнуванню гофра або "скочуванню" гофра.

NOTE: The local plastic buckling resistance is the resistance to corrugation collapse or “roll-down”.

(2) Розрахункове значення локального опору пластичному повздовжньому вигину повинне визначатися як:

(2) The design value of the local plastic buckling resistance should be determined as:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x n_{x,Rk} / \gamma_{M0} \tag{5.62}$$

де:
α_x коефіцієнт зменшення дефектності при пластичному повздовжньому вигині;
γ_{M0} частковий коефіцієнт, приведений в 2.9.2.

where:
α_x is the elastic buckling imperfection reduction factor;
γ_{M0} is the partial factor given in 2.9.2.

Примітка: Значення α_x може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\alpha_x = 0{,}80$.

NOTE: The National Annex may choose the value of α_x. The value $\alpha_x = 0{,}80$ is recommended.

(3) В усіх точках конструкції результуючі розрахункового напруження повинні задовольняти наступну умову:

(3) At every point in the structure the design stress resultants should satisfy the condition:

$$n_{x,Ed} \leq n_{x,Rd} \tag{5.63}$$

5.3.4.3.3 *Стінка з ребрами жорсткості в якості ортотропної оболонки*

5.3.4.3.3 *Stiffened wall treated as an orthotropic shell*

(1) Якщо стінка розглядається в якості ортотропної оболонки (метод (а) в 5.3.4.3.1), значення жорсткості листової обшивки у різних напрямах повинно запозичуватися з 4.4. Результуючі значення розподіленої жорсткості повинні сприйматися як рівномірно розподілені. Еквівалентна серединна поверхня оболонки повинна пролягати уздовж центральної осі, від якої вимірюється амплітуда (див. рисунок 4.2).

(1) If the wall is treated as an orthotropic shell (method (a) in 5.3.4.3.1), the stiffnesses of the sheeting in different directions should be taken from 4.4. The resulting smeared stiffnesses should be taken to be uniformly distributed. The equivalent shell middle surface should be taken as the central axis from which the amplitude is measured (see Fig. 4.2).

(2) Відстань між ребрами жорсткості по горизонталі d_s повинна складати не більше $d_{s,max}$, представлене наступним виразом:

(2) The horizontal distance between stiffeners d_s should not be more than $d_{s,max}$ given by:

$$d_{s,\max} = k_{dx}\left(\frac{r^2 D_y}{C_y}\right)^{0,25} \tag{5.64}$$

де:
D_y згинна жорсткість на одиницю ширини найтонших листів обшивки, паралельних гофрам;
C_y жорсткість розтягу на одиницю ширини найтонших листів обшивки, паралельних гофру;
r радіус циліндра.

where:
D_y is the flexural rigidity per unit width of the thinnest sheeting parallel to the corrugations;
C_y is the stretching stiffness per unit width of the thinnest sheeting parallel to the corrugations;
r is the cylinder radius.

Примітка: Значення k_{dx} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення k_{dx} = 7,4.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_{dx}. The value k_{dx} = 7,4 is recommended.

(3) Результуюча критичного напруження при повздовжньому вигині $n_{x,Rcr}$ на одиницю довжини кола ортотропної оболонки (метод (а) в 5.3.4.3.1) повинна оцінюватися на кожному відповідному рівні бункера шляхом мінімізації нижченаведеного виразу відносно граничного периферичного хвилевого числа j і висоти зони повздовжнього

(3) The critical buckling stress resultant $n_{x,Rcr}$ per unit circumference of the orthotropic shell (method (a) in 5.3.4.3.1) should be evaluated at each appropriate level in the silo by minimising the following expression with respect to the critical circumferential wave number j and the buckling height l_i:

вигину l_i:

$$n_{x,Rcr} = \frac{1}{j^2\omega^2}\left(A_1 + \frac{A_2}{A_3}\right) \tag{5.65}$$

при (with):

$$A_1 = j^4\,[\omega^4 C_{44} + 2\omega^2(C_{45}+C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \tag{5.66}$$

$$A_2 = 2\omega^2\,(C_{12}+C_{33})\,(C_{22}+j^2C_{25})\,(C_{12}+j^2\omega^2C_{14}) - (\omega^2C_{11}+C_{33})\,(C_{22}+j^2C_{25})^2 - \\ - \omega^2(C_{22}+\omega^2C_{33})\,(C_{12}+j^2\omega^2C_{14})^2 \tag{5.67}$$

$$A_3 = (\omega^2C_{11}+C_{33})\,(C_{22}+C_{25}+\omega^2C_{33}) - \omega^2(C_{12}+C_{33})^2 \tag{5.68}$$

разом з (with):

$$C_{11} = C_\upsilon + EA_s/d_s \qquad C_{22} = C_\theta + EA_r/d_r$$

$$C_{12} = \nu\sqrt{C_\varphi C_\theta} \qquad C_{33} = C_{\upsilon\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s/(rd_s) \qquad C_{25} = e_r EA_r/(rd_r)$$

$$C_{44} = [D_\upsilon + EI_s/d_s + EA_s e_s^2/d_s]/r^2 \qquad C_{55} = [D_\theta + EI_r/d_r + EA_r e_r^2/d_r]/r^2$$

$$C_{45} = \nu\sqrt{D_\varphi D_\theta}/r^2 \qquad C_{66} = [D_{\upsilon\theta} + 0{,}5(GI_{ts}/d_s + GI_{tr}/d_r)]/r^2$$

$$\omega = \frac{\pi r}{jl_i}$$

де:

l_i половина довжини хвилі потенційного повздовжнього вигину у вертикальному напрямі;

A_s площа поперечного перерізу повздовжнього ребра жорсткості;

I_s момент інерції повздовжнього ребра жорсткості відносно осі кола (згин в вертикальному напрямі);

d_s відстань між повздовжніми ребрами жорсткості;

I_{ts} стала кручення повздовжнього ребра жорсткості;

e_s зовнішній ексцентриситет відносно серединної поверхні оболонки з повздовжнім ребром жорсткості;

A_r площа поперечного перерізу кільцевого ребра жорсткості;

I_r момент інерції кільцевого ребра жорсткості відносно вертикальної осі (згин у кільцевому напрямі);

d_r відстань між кільцевими ребрами жорсткості;

I_{tr} стала кручення кільцевого ребра жорсткості;

e_r зовнішній ексцентриситет відносно серединної поверхні оболонки з кільцевим ребром жорсткості;

C_υ жорсткість на розтяг обшивки в осьовому напрямі (див. 4.4 (5) і (7));

C_θ жорсткість на розтяг обшивки в

where:

l_i is the half wavelength of the potential buckle in the vertical direction;

A_s is the cross-sectional area of a stringer stiffener;

I_s is the second moment of area of a stringer stiffener about the circumferential axis (vertical 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 is the cross-sectional area of a ring stiffener;

I_r is the second moment of area of a ring stiffener about the vertical axis (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_υ is the sheeting stretching stiffness in the axial direction (see 4.4 (5) and (7));

C_θ is the sheeting stretching stiffness in

кільцевому напрямі (див. 4.4 (5) і (7));

$C_{\upsilon\theta}$ жорсткість на розтяг обшивки при мембранному зсуві (див. 4.4 (5) і (7));
D_υ згинна жорсткість обшивки в осьовому напрямі (див. 4.4 (6) і (7));
D_θ жорсткість вигину обшивки в кільцевому напрямі (див. 4.4 (6) і (7));
$D_{\upsilon\theta}$ жорсткість вигину на кручення обшивки при скручуванні (див. 4.4 (6) і (7));
r - радіус бункера.

Примітка 1: Приведені вище властивості ребер жорсткості (A, I, I_t і т. д.) стосуються тільки деталей ребра жорсткості: до ефективного перерізу нетто, включаючи елементи стінки оболонки, не повинні застосовуватися ніякі допуски і припуски.

Примітка 2: За нижню межу повздовжнього вигину може бути прийнята точка, в якій змінюється товщина обшивки або поперечний переріз ребра жорсткості: опір повздовжньому вигину при такій зміні необхідно контролювати незалежно.

(5) Розрахунковий опір повздовжньому вигину $n_{x,Rd}$ ортотропної оболонки (метод (a) в 5.3.4.3.1) повинен визначатися як найменше з:

the circumferential direction (see 4.4 (5) and (7));
$C_{\upsilon\theta}$ is the sheeting stretching stiffness in membrane shear (see 4.4 (5) and (7));
D_υ is the sheeting flexural rigidity in the axial direction (see 4.4 (6) and (7));
D_θ is the sheeting flexural rigidity in the circumferential direction (see 4.4 (6) and (7));
$D_{\upsilon\theta}$ is the sheeting twisting flexural rigidity in twisting (see 4.4 (6) and (7));

r is the radius of the silo.

NOTE 1: The above properties for the stiffeners (A, I, I_t etc.) relate to the stiffener section alone: no allowance can be made for an "effective" section including parts of the shell wall.

NOTE 2: 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.

(5) The design buckling resistance $n_{x,Rd}$ for the orthotropic shell (method (a) in 5.3.4.3.1) should be determined as the lesser of:

$$n_{x,Rd} = \alpha_x \, n_{x,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (5.69)$$

та (and)

$$n_{x,Rd} = A_s f_y / \gamma_{M1} \quad (5.70)$$

де:
α_x коефіцієнт зменшення пластичної деформації при повздовжньому вигині;
γ_{M1} частковий коефіцієнт, приведений в 2.9.2.

Примітка: Значення α_x може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\alpha_x = 0{,}80$.

(6) В усіх точках конструкції результуючі розрахункового напруження повинні задовольняти наступній умові:

where:
α_x is the elastic buckling imperfection reduction factor;
γ_{M1} is the partial factor given in 2.9.2.

NOTE: The National Annex may choose the value of α_x. The value $\alpha_x = 0{,}80$ is recommended.

(6) At every point in the structure the design stress resultants should satisfy the condition:

$$n_{x,Ed} \le n_{x,Rd} \quad (5.71)$$

5.3.4.3.4 *Посилена стінка в якості несучої осьового стиску тільки в ребрах жорсткості*

(1) Якщо, імовірно, гофрована

5.3.4.3.4 *Stiffened wall treated as carrying axial compression only in the stiffeners*

(1) If the corrugated sheeting is assumed

обшивка не несе осьове навантаження (метод (б) в 5.3.4.3.1), передбачається, що оболонка може витримати усі деформації при повздовжньому вигині ребра жорсткості в площині стінки. При цьому опір вигину повинен розраховуватися з допомогою одного з двох альтернативних методів, приведених нижче:

а) ігнорування підтримувальної дії оболонки при визначенні опору деформації в напрямі перпендикулярному відносно стінки;

б) введення поправки на жорсткість оболонки при визначенні опору дефор-мації в напрямку перпендикулярному стінці.

to carry no axial force (method (b) in 5.3.4.3.1), 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 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) При застосуванні методу (а), згаданого в (1), опір окремого ребра жорсткості може бути прийнято за опір концентричному стиску ребра жорсткості. Розрахунковий опір повздовжньому вигину $N_{b,Rd}$ виводиться з наступного виразу:

(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 $N_{b,Rd}$ should be obtained from:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (5.72)$$

де:

A_{eff} корисна площа поперечного перерізу ребра жорсткості.

where:

A_{eff} is the effective cross-sectional area of the stiffener.

Знижуючий коефіцієнт χ міститься в стандарті EN 1993-1-1 для втрати стійкості через вигін в напрямі перпендикулярному стінці (відносно кільцевої осі) за допомогою кривої деформації повздовжнього вигину *c* безвідносно до прийнятого перерізу (коефіцієнту дефектності α = 0,49). Корисна довжина стійки, яка використовується для визначення знижуючого коефіцієнта χ, має бути прийнята за відстань між сусідніми кільцевими ребрами жорсткості.

The reduction factor χ should be obtained from EN 1993-1-1 for flexural bucking normal to the wall (about the circumferential axis) using buckling curve *c* irrespective of the section adopted (imperfection factor α= 0,49). The effective length of column used in determining the reduction factor χ should be taken as the distance between adjacent ring stiffeners.

(3) Якщо взяти до уваги пружній стан, який забезпечує стінка, протидіючи повздовжньому вигину ребра жорсткості, мають бути виконані дві наступні умови:

а) довжина тієї частини стінки, яка забезпечує пружній стан, має дорівнювати відстані між сусідніми ребрами

(3) 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 5.5), with

жорсткості (див. рисунок 5.5) з двома вільно опертими краями;

б) вірогідна щільність сипучого матеріалу, що зберігається, не повинна враховуватися.

simply supported conditions at the two ends.

b) No account should be taken of the possible stiffness of the stored bulk solid.

(4) Якщо не проводити точніші розрахунки, критичний опір повздовжньому вигину $N_{b,Rd}$ повинен обчислюватися, виходячи з припущення, що усі рівні поперечного перерізу витримують рівномірне зусилля стиску, визначається як найменше з двох виразів :

(4) Unless more precise calculations are made, the critical buckling resistance $N_{b,Rd}$ should be calculated assuming uniform compression on the cross-section at any level, as the lesser of the two expressions:

$$N_{b,Rd} = 2\frac{\sqrt{EI_y K}}{\gamma_{M1}} \tag{5.73}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \tag{5.74}$$

де:

EI_y згинна жорсткість ребра жорсткості при вигині поза площиною стінки (Нмм^2);

K згинна жорсткість листової обшивки (Н/мм на мм висоти стінки) в прольоті між вертикальними ребрами жорсткості; див. рисунок 5.5;

A_{eff} корисна площа поперечного перерізу ребра жорсткості.

where:

EI_y is the flexural rigidity of the stiffener for bending out of the plane of the wall (Nmm^2);

K is the flexural stiffness of the sheeting (N/mm per mm of wall height) spanning between vertical stiffeners, as indicated in figure 5.5;

A_{eff} is the effective cross-sectional area of the stiffener.

(5) Згинна жорсткість листа стінки, оболонки K повинна визначатися, виходячи з припущення, що краї листів в прольотах між сусідніми вертикальними ребрами жорсткості знаходяться у вільно опертому стані з обох боків; див. рисунок 5.5. Значення K можна визначити за допомогою виразу:

(5) The flexural stiffness of the wall plate K should be determined assuming that the sheeting spans between adjacent vertical stiffeners on either side with simply supported boundary conditions, see figure 5.5. The value of K may be estimated as:

$$K = k_s \frac{D_y}{d_s^3} \tag{5.75}$$

де:

D_y згинна жорсткість листової обшивки при вигині в кільцевому напрямі;

d_s відстань між вертикальними ребрами жорсткості.

where:

D_y is the flexural rigidity of the sheeting for circumferential bending;

d_s is the separation of the vertical stiffeners.

Якщо гофри мають дугоподібну або синусоїдальну конфігурацію, значення D_y можна використовувати з 4.4 (6). Якщо застосовуються гофри іншого перерізу, згинна жорсткість при вигині в

If the corrugation is an arc-and-tangent or sinusoidal profile, the value of D_y may be taken from 4.4 (6). If other corrugation sections are adopted, the flexural rigidity for circumferential bending should be determined

кільцевому напрямі повинна визначатися на підставі первинних принципів.

from first principles.

Примітка: Значення k_s може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_s = 6$.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_s .The value $k_s = 6$ is recommended.

(6) В усіх точках ребра жорсткості розрахункові значення сил повинні задовольняти наступній умові:

(6) At every point in the stiffener, the design forces should satisfy the condition:

$$N_{b,Ed} \le N_{b,Rd} \qquad (5.76)$$

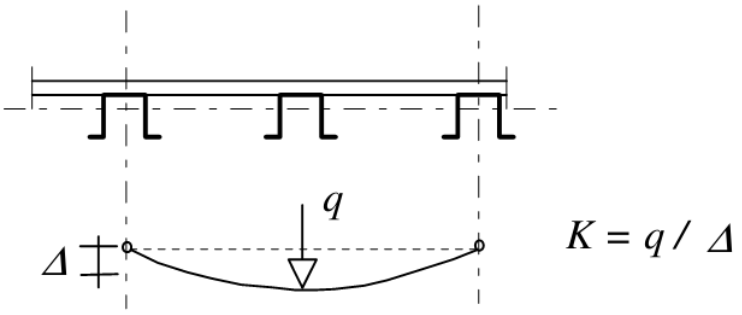


Рисунок 5.5 Оцінка стійкості при стримуванні повздовжнього вигину стійки, посиленої ребрами жорсткості

Figure 5.5 Evaluation of restraint stiffness against stiffener column buckling

5.3.4.4 *Локальне, деформаційне і згинне руйнування ребер жорсткості при крученні*

5.3.4.4 *Local, distortional and flexural torsional failure of stiffeners*

(1) Опір ребер жорсткості локальному, деформаційному і згинному руйнуванню при крученні повинен визначатися відповідно до стандарту EN 1993-1-3 (холодне штампування будівельних конструкцій).

(1) The resistance of the stiffeners to local, distortional and flexural torsional buckling should be determined using EN 1993-1-3 (cold formed construction).

5.3.4.5 *Повздовжній згин під впливом зовнішнього тиску, часткової розрідженості або вітру*

5.3.4.5 *Buckling under external pressure, partial vacuum or wind*

(1) Еквівалентні мембранні і згинні властивості оболонки визначаються згідно 4.4.

(1) The equivalent membrane and flexural properties of the sheeting should be found using 4.4.

(2) Властивості кільцевих і повздовжніх ребер рідини при вигині і розтязі, а також зовнішній ексцентриситет при зміщенні їх центру відносно серединної поверхні стінки оболонки повинні визначатися одночасно з відстанню між ребрами жорсткості d_s.

(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) Відстань між ребрами жорсткості d_s в горизонтальній площині не повинна перевищувати величину $d_{s,\max}$ представлену наступним виразом:

(3) The horizontal distance between stiffeners d_s should not be more than $d_{s,\max}$ given by:

$$d_{s,\max} = k_{d\theta}\left(\frac{r^2 D_y}{C_y}\right)^{0,25} \tag{5.77}$$

де:

D_y згинна жорсткість на одиницю ширини в найтоншому місці оболонки паралельному гофрам;

C_y жорсткість при розтязі на одиницю ширини в найтоншому місці оболонки паралельному гофрам;

r радіус циліндра.

where:

D_y is the flexural rigidity per unit width of the thinnest sheeting parallel to the corrugations;

C_y is the stretching stiffness per unit width of the thinnest sheeting parallel to the corrugations;

r is the cylinder radius.

Примітка: Значення $k_{d\theta}$ може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_{d\theta}$ = 7,4.

NOTE: The National Annex may choose the value of $k_{d\theta}$. The value $k_{d\theta}$ = 7,4 is recommended.

(4) Критичне напруження повздовжнього вигину при рівномірному зовнішньому тиску $p_{n,Rcru}$ повинне визначатися шляхом мінімізації наступного виразу відносно граничного периферичного хвилевого числа, j:

(4) The critical buckling stress for uniform external pressure $p_{n,Rcru}$ should be evaluated by minimising the following expression with respect to the critical circumferential wave number, j:

$$p_{n,Rcru} = \frac{1}{rj^2}\left(A_1 + \frac{A_2}{A_3}\right) \tag{5.78}$$

з (with):

$$A_1 = j^4\left[\omega^4 C_{44} + 2\omega^2(C_{45}+C_{66}) + C_{55}\right] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \tag{5.79}$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12}+C_{33})(C_{22}+j^2 C_{25})(C_{12}+j^2\omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11}+C_{33})(C_{22}+j^2 C_{25})^2 - \\ - \omega^2(C_{22}+\omega^2 C_{33})(C_{12}+j^2\omega^2 C_{14})^2 \tag{5.80}$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33})(C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2(C_{12} + C_{33})^2 \tag{5.81}$$

з (with):

$$C_{11} = C_\upsilon + EA_s / d_s \qquad C_{22} = C_\theta + EA_r / d_r$$

$$C_{12} = \nu\sqrt{C_\varphi C_\theta} \qquad C_{33} = C_{\upsilon\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (rd_s) \qquad C_{25} = e_r EA_r / (rd_r)$$

$$C_{44} = [D_\upsilon + EI_s/d_s + EA_s e_s^2/d_s] / r^2 \qquad C_{55} = [D_\theta + EI_r/d_r + EA_r e_r^2/d_r] / r^2$$

$$C_{45} = \nu\sqrt{D_\varphi D_\theta} / r^2 \qquad C_{66} = [D_{\upsilon\theta} + 0{,}5(GI_{ts}/d_s + GI_{tr}/d_r)] / r^2$$

$$\omega = \frac{\pi r}{jl_i}$$

де l_i, r, A_s, I_s, I_{ts}, d_s, e_s, A_r, I_r, I_{tr}, d_r і e_r мають значення, визначені в 5.3.4.3.3(3).

where l_i, r, A_s, I_s, I_{ts}, d_s, e_s, A_r, I_r, I_{tr}, d_r and e_r have the meanings defined in 5.3.4.3.3(3).

(5) Якщо ребра жорсткості або листова оболонка змінюються по висоті

(5)Where the stiffeners or sheeting change with height up the wall, several potential

стінки, щоб визначити найкритичнішу ділянку, вірогідна довжина зони повздовжнього вигину l_i має бути досліджена в декількох точках. При цьому необхідно завжди враховувати, що верхній край вигину знаходиться на вершині зони з найтоншою листовою обшивкою.

buckling lengths l_i should be examined to determine which is the most critical, assuming always that the upperend of a buckle is at the top of the zone of thinnest sheeting.

Примітка: Якщо зона з більш товстою обшивкою знаходиться вище за зону з найтоншою листовою обшивкою, верхній край вірогідного вигину може виявитися або на вершині найтоншої зони, або на вершині стінки.

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.

(6) Якщо не проводити точніші розрахунки, товщину в приведених вище розрахунках треба приймати як товщину найтоншої частини листової обшивки.

(6) Unless more precise calculations are made, the thickness assumed in the above calculation should be taken as the thickness of the thinnest sheeting throughout.

(7) Якщо бункер не має даху і схильний до вірогідного повздовжнього вигину під дією вітру, в приведених вище розрахунках тиску має бути застосований понижуючий коефіцієнт 0,6.

(7) Where the silo has no roof and is potentially subject to wind buckling, the above calculated pressure should be reduced by the factor 0,6.

(8) Розрахункове напруження повздовжнього вигину для стінки повинне визначатися в порядку, вказаному в 5.3.2.5, при $C_b = C_w = 1{,}0$ і $\alpha_n = 0{,}5$, а критичне значення тиску при повздовжньому вигині $p_{n,Rcru}$ може бути запозичене з приведеного вище пункту (4).

(8) The design buckling stress for the wall should be determined using the procedure given in 5.3.2.5, with $C_b = C_w = 1{,}0$ and taking $\alpha_n = 0{,}5$, but adopting the critical buckling pressure $p_{n,Rcru}$ from (4) above.

5.3.4.6 *Мембранний зсув*

5.3.4.6 *Membrane shear*

(1) Опір оболонки повздовжньому вигину при мембранному зсуві повинен визначатися на підставі положень стандарту EN 1993-1-6.

(1) The buckling resistance of the shell under membrane shear should be determined using the provisions of EN 1993-1-6.

5.3.5 *Стінки з вертикальним гофром і кільцевими ребрами жорсткості*

5.3.5 *Vertically corrugated walls with ring stiffeners*

5.3.5.1 *Загальні положення*

5.3.5.1 *General*

(1) Якщо циліндрична стінка виготовлена з гофрованого листа з гофром, розташованим по вертикалі, мають бути виконані дві наступні умови:
а) гофрована стінка повинна розглядатися як не несуча горизонтальних

(1) If the cylindrical wall is fabricated using corrugated sheeting with the corrugations running vertically, both of the following conditions should be met:
a) The corrugated wall should be assumed to carry no horizontal forces.

навантажень;

б) гофрована листова обшивка повинна вважатися прольотом між прикріпленими кільцями, тобто відстанню між центрами кілець; при цьому листова обшивка розглядається як нерозривна оболонка.

(2) З'єднання між секціями обшивки мають бути розраховані так, щоб вони гарантували досягнення визначенної згинної стійкості.

(3) При розрахунку сили осьового стиску стінки, що виникає під впливом сил тертя сипучого твердого матеріалу об стінку, має бути враховане повне коло бункера, що допускає фасонний контур гофра.

(4) Якщо гофрована обшивка досягає основної граничної умови, має бути врахований локальний згин обшивки у міру наближення межі; при цьому визначається межа, обмежена по радіусу.

(5) Результуючі розрахункових параметрів напруження, опору і контрольних параметрів повинні визначатися відповідно до 5.3.2, але з урахуванням додаткових положень, передбачених в 5.3.5.2 – 5.3.5.5.

5.3.5.2 *Граничний стан пластичності*

(1) При перевірці граничного стану пластичності, гофрована стінка повинна бути визначена як така, що не несе будь-яких навантажень в кільцевому напрямі.

(2) Інтервал між кільцевими ребрами жорсткості повинен визначатися за допомогою розрахунку на поперечний згин гофрованого профілю, виходячи з припущення, що стінка в місцях кріплення кілець безперервна і включаючи наслідки різного радіального зміщення кілець жорсткості, що мають різні розміри. При перевірці опору повздовжньому вигину під впливом осьового стиску напруження, що виникають в результаті такого вигину, повинні підсумовуватися з тими, які

b) The corrugated sheeting should be assumed to span between attached rings, using the centre to centre separation between rings, 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 silo, 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 design stress resultants, resistances and checks should be carried out as in 5.3.2, but including the additional provisions set out in 5.3.5.2 to 5.3.5.5.

5.3.5.2 *Plastic limit state*

(1) In checking the plastic limit state, the corrugated wall should be assumed to carry no circumferential forces.

(2) 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.

виникають в результаті осьового стиску.

Примітка: Вертикальний згин обшивки можна розрахувати, розглядаючи його як безперервний проліт, що проходить через гнучкі опори в місцях кріплення кілець. Тоді жорсткість кожної опори визначається виходячи з жорсткості кілець по відношенню до радіальних навантажень.

NOTE: The vertical 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.

(3) Кільцеві ребра жорсткості, запроектовані з метою утримання горизонтального навантаження, повинні мати пропорції, що задовольняють стандартам EN 1993-1-1 і EN 1993-1-3, відповідно.

(3) The ring stiffeners designed to carry the horizontal load should be proportioned in accordance with EN 1993-1-1 and EN 1993-1-3 as appropriate.

5.3.5.3 *Повздовжній згин при осьовому стиску*

5.3.5.3 *Buckling under axial compression*

(1) Критичне напруження при повздовжньому вигині стінки повинне визначатися з урахуванням положень стандарту EN 1993-1-3 (холодне штампування будівельних конструкцій). Поперечний переріз гофрованої обшивки повинен розглядатися як переріз стійки між кільцевими ребрами жорсткості. Корисну довжину слід прийняти за величину не меншу ніж відстань між центрами тяжіння поперечного перерізу суміжних кілець.

(1) The critical buckling stress for the wall should be determined using the provisions of EN 1993-1-3 (cold formed construction), and treating the corrugated sheeting cross-section as a column acting between stiffening rings. The effective length should be taken as not less than the separation of the centroids of adjacent rings.

5.3.5.4 *Повздовжній згин під впливом зовнішнього тиску, часткової розрідженості чи вітру*

5.3.5.4 *Buckling under external pressure, partial vacuum or wind*

(1) Розрахунковий опір під впливом зовнішнього тиску повинен розраховуватися таким самим чином, як у бункерах з горизонтальним гофром (див. 5.3.4.5), але з урахуванням зміни орієнтації гофра, як відмічено в 4.4 (7).

(1) The design resistance under external pressure should be assessed in the same manner as for horizontally corrugated silos (see 5.3.4.5), but taking account of the changed orientation of the corrugations as noted in 4.4 (7).

5.3.5.5 *Мембранний зсув*

5.3.5.5 *Membrane shear*

(1) Розрахунковий опір при мембранному зсуві повинен визначатися так само, як у бункерах з горизонтальним гофром; див. 5.3.4.6.

(1) The design resistance under membrane shear should be assessed as for horizontally corrugated silos, see 5.3.4.6.

5.4 Особливі умови підтримки циліндричних стінок

5.4 Special support conditions for cylindrical walls

5.4.1 ***Дно оболонки з суцільною опорою або ростверком***

(1) Якщо основа циліндричної оболонки має суцільну опору, можна враховувати тільки ті, сили, що впливають на стінку оболонки, і моменти, дія яких викликана вісесиметричними і локалізованими навантаженнями, як передбачено стандартом EN 1991-4.

(2) Якщо застосовується посилена ребрами конструкція стінки, вертикальні ребра жорсткості повинні мати в основі суцільну опору і мають бути сполучені з кільцевою основою.

5.4.2 ***Оболонка, що спирається на юбку***

(1) Якщо оболонка спирається на юбку (див. рисунок 5.6), можна припустити, що оболонка підтримується рівномірно за умови, що юбка задовольняє одному з двох, нижченаведених умов:

а) власне юбка цілком і рівномірно підтримується фундаментом;

б) товщина юбки не менше ніж на 20% більше товщини оболонки, а процедури проектування кільцевої балки, приведені в розділі 8, використовуються з метою розрахунку розмірів юбки і суміжних з нею полиць.

(2) Проект юбки має бути розрахований на утримання осьового стиску стінки бункера без благоприємної дії внутрішнього тиску.

5.4.3 ***Стінка циліндричної оболонки з півколонами***

(1) Якщо оболонка спирається на відособлені стійки, які закріплені на стінці циліндра (див. рисунок 5.6 б), дія розрізнених сил, витікаючих від цих опорних стійок, має бути включена в розрахунок внутрішніх сил, які впливають на оболонку бункерів для класів наслідків 2 і 3.

(2) Довжина зачеплення опорної стійки повинна визначатися відповідно до

5.4.1 ***Shell with bottom fully supported or resting on a grillage***

(1) Where the base of the cylindrical shell is fully supported, the forces and moments in the shell wall may be deemed to be only those induced under axisymmetric actions and patch loads as set out in EN 1991-4.

(2) Where stiffened wall construction is used, the vertical stiffeners should be fully supported by the base and connected to the base ring.

5.4.2 ***Shell supported by a skirt***

(1) If the shell is supported on a skirt (see figure 5.6), the shell may be assumed to be uniformly supported provided that the skirt satisfies one of the two following conditions:

a) The skirt is itself fully uniformly supported by the foundation;

b) The thickness of the skirt is not less than 20% greater than the shell, and the ring girder design procedures given in section 8 are used to proportion the skirt and its adjoining flanges.

(2) The skirt should be designed to carry the axial compression in the silo wall without the beneficial effect of internal pressure.

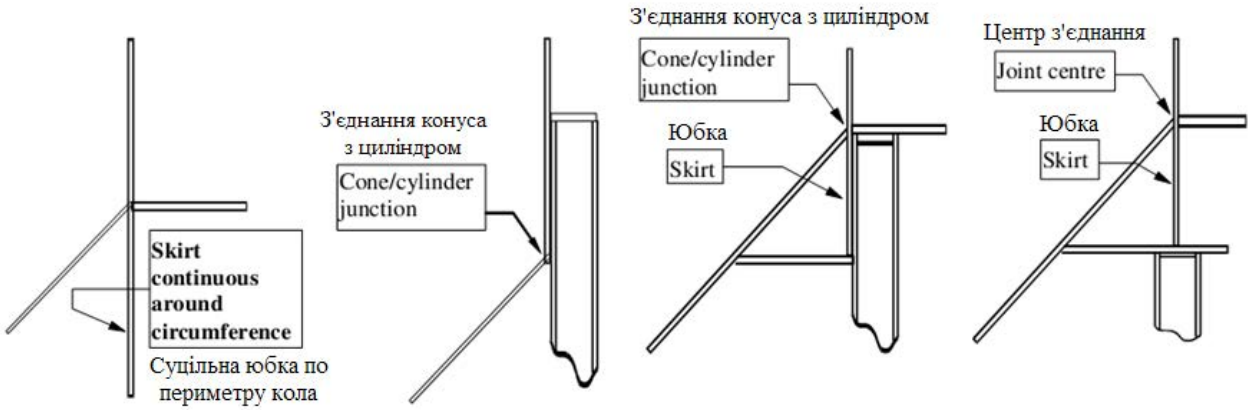
5.4.3 ***Cylindrical shell wall with engaged columns***

(1) If the shell is supported on discrete columns that are engaged into the wall of the cylinder (see figure 5.6b), the effects of the discrete forces from these supports should be included in determining the internal forces in the shell for silos of Consequence Classes 2 and 3.

(2) The length of the engagement of the column should be determined according to

5.4.6.
(3) Довжина ребра жорсткості має бути вибрана з урахуванням граничного стану повздовжнього вигину при зсуві елементів, суміжних з ребром; див. 5.3.2.6.

5.4.6.
(3) The length of the rib should be chosen taking account of the limit state of buckling in shear adjacent to the rib, see 5.3.2.6.



а) оболонка, що спирається на юбку;

a) shell supported on skirt

б) циліндрична оболонка з півколоною;

b) cylindrical shell with engaged column

с) стійка, пов'язана із юбкою несиметрично відносно центру;

c) column eccentrically engaged to skirt

д) стійка нижча юбки або циліндра

d) column beneath skirt or cylinder

Рисунок 5.6 Різні схеми опори для бункера з хопером
Figure 5.6 Different arrangements for support of silo with hopper

5.4.4 *Циліндрична оболонка на відособлених опорах*

(1) Якщо оболонка спирається на відособлені стійки або опори, вплив розрізнених сил, що відходять від цих опор повинен бути врахований при розрахунку внутрішніх сил, що впливають на оболонку, за винятком випадків, коли положення пунктів (2) і (3) дозволяють нехтувати ними.

(2) Якщо розрахунок оболонки виконується за допомогою тільки мембранної теорії оболонок при вісесиметричному навантаженні, мають бути задоволені усі чотири з нижченаведених критеріїв:
а) відношення радіусу до товщини r/t має бути не більше $(r/t)_{max}$.
б) ексцентриситет опори нижче стінки оболонки має бути не більший $k_1 t$.
с) циліндрична стінка має бути жорстко прив'язана до хопера, товщина стінки якого у точці переходу складає не менше $k_2 t$.

5.4.4 *Discretely supported cylindrical shell*

(1) If the shell is supported on discrete columns or supports, the effects of the discrete forces from these supports should be included in determining the internal forces in the shell, except where the provisions of (2) and (3) permit them to be ignored.

(2) If the shell is analysed using only the membrane theory of shells for axisymmetric loading, the following four criteria should all be satisfied:

a) The radius-to-thickness ratio r/t should not be more than $(r/t)_{max}$.
b) The eccentricity of the support beneath the shell wall should not be more than $k_1 t$.
c) The cylindrical wall should be rigidly connected to a hopper that has a wall thickness not less than $k_2 t$ at the transition.

д) ширина кожної опори має бути не менше $k_3\sqrt{rt}$

Примітка: Значення $(r/t)_{max}$, k_1, k_2 і k_3 можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендуються значення $(r/t)_{max}$= 400, k_1= 2,0, k_2= 1,0, k_3= 1,0.

(3) Якщо розрахунок оболонки виконується за допомогою тільки мембранної теорії оболонок при вісесиметричному навантаженні, має бути задоволений один з трьох нижче-наведених критеріїв:

а) повинна підтримуватися округлість верхнього граничного краю оболонки за допомогою конструктивного рішення відносно з'єднання з дахом;

б) повинна підтримуватися округлість верхнього граничного краю оболонки за допомогою кінцевого кільця жорсткості на вершині, що має згинну жорсткість EI_z при вигині в площині окружності з жорсткістю більше $EI_{z,\min}$, представленою виразом :

де величина t має бути прийнята за товщину найтоншої ділянки стінки.

Примітка: Значення k_s. може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення k_s.= 0,10.

c) Висота оболонки L має бути не менше $L_{s,\min}$, яка обчислюється за формулою:

де n кількість опорних стійок, розташованих по периметру кола оболонки.

Примітка: Значення k_L може бути задано в Національному додатку. Рекомендується значення k_L = 4,0.

(4) Якщо застосовується лінійна теорія вигину оболонки або точніший аналітичний метод, з метою верифікації граничного стану повздовжнього вигину при осьовому стиску повинен бути

d) The width of each support should be not less than $k_3\sqrt{rt}$.

NOTE: The National Annex may choose the values of $(r/t)_{max}$, k_1, k_2 and k_3. The values $(r/t)_{max}$= 400, k_1= 2,0, k_2= 1,0, k_3= 1,0 are recommended.

(3) If the shell is analysed using only the membrane theory of shells for axisymmetric loading, one of thethree following criteria should be met:

a) The upper edge shell boundary condition should be kept circular by structural connection to a roof.

b) The upper edge shell boundary should be kept circular by using a top edge ring stiffener with a flexural rigidity EI_z for bending in the plane of the circle greater than $EI_{z,\min}$ given by:

$$EI_{z,\min} = k_s E r t^3 \tag{5.82}$$

where t should be taken as the thickness of the thinnest part of the wall.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_s. The value k_s = 0,10 is recommended.

c) The shell height L should not be less than $L_{s,\min}$, which may be calculated as:

$$L_{s,\min} = k_L r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \cdot \frac{1}{n\left(n^2-1\right)}} \tag{5.83}$$

where n is the number of supports around the shell circumference.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_L. The value k_L = 4,0 is recommended.

(4) If linear shell bending theory or a more precise analysis is used, the effects of locally high stresses above the supports should be included in the verification for the axial compression buckling limit state, as detailed in

врахований ефект дії локалізації високого напруження над опорами; детально розглянутий в 5.3.2.4.

(5) Опори для оболонки повинні мати пропорції, що задовольняють положенням 5.4.5 або 5.4.6, відповідно.

5.4.5 ***Бункер, що спирається на відособлені стійки, розташовані під хопером***

(1) Бункер слід розглядати як такий, що має опору під хопером, якщо вертикальна лінія над центром тяжіння опорного елементу перевищує величину *t* усередині і вище середньої поверхні циліндричної оболонки.

(2) Бункер, що спирається на стійки, розташовані під хопером, повинен задовольняти положенням, визначенним в розділі 6, які стосуються проектування хоперів.

(3) Розрахунок бункера, що спирається на стійки, розташовані під хопером, повинен виконуватися із застосуванням лінійної теорії вигину оболонки або більш точного аналітичного методу. Локальні ефекти вигину опорних стійок і меридіального стиску, які виникають у верхній частині хопера, повинні братися до уваги при розрахунках з метою верифікації як граничного стану пластичності, так і стану граничного вигину. Така верифікація повинна виконуватися у відповідності до вимог стандарту EN 1993-1-6.

5.4.6 ***Деталі локальних опор і ребра жорсткості для перенесення навантаження на циліндричні стінки***

5.4.6.1 *Локальні опори під стінкою циліндра*

(1) Локальний опорний кронштейн під стінкою циліндра повинен мати відповідні пропорції, співвимірні розрахунковій силі, яка передається без локалізованої безповоротної деформації опори або

5.3.2.4.

(5) The support for the shell should be proportioned to satisfy the provisions of 5.4.5 or 5.4.6 as appropriate.

5.4.5 ***Discretely supported silo with columns beneath the hopper***

(1) A silo should be deemed to be supported beneath its hopper if the vertical line above the centroid of the supporting member is more than *t* inside the middle surface of the cylindrical shell above it.

(2) A silo supported beneath its hopper should satisfy the provisions of section 6 on hopper design.

(3) A silo supported by columns beneath its hopper should be analysed using linear shell bending theory or a more precise analysis. The local bending effects of the supports and the meridional compression that develops in the upper part of the hopper should be included in the verification for both the plastic limit state and the buckling limit state, and these verifications should be carried out using EN 1993-1-6.

5.4.6 ***Local support details and ribs for load introduction in cylindrical walls***

5.4.6.1 *Local supports beneath the wall of a cylinder*

(1) A local support bracket beneath the wall of a cylinder should be proportioned to transmit the design force without localised irreversible deformation to the support or the shell wall.

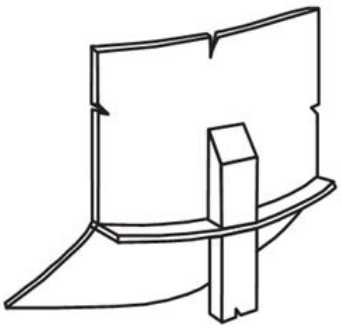
стінки оболонки.

(2) Опори повинні мати пропорції, які забезпечать на краю циліндра відповідне утримання кручення у вертикальному, кільцевому і меридіальному напрямах.

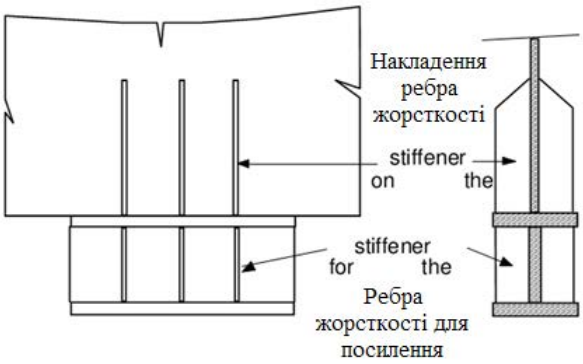
(2) The support should be proportioned to provide appropriate vertical, circumferential and meridional rotational restraint to the edge of the cylinder.

Примітка: Деякі з можливих деталей опорних стійок показані на рисунку 5.7.

NOTE: Some possible support details are shown in figure 5.7.



Локальна опора перехідного кільця з півколоною
Local support at transition ring with engaged column



Можлива схема посилення циліндричної стінки при високих навантаженнях на локальні опори
Possible stiffening arrangement for cylindrical wall with high local support loads

Рисунок 5.7 Типові деталі опорних стійок
Figure 5.7 Typical details of supports

(3) Довжина зачеплення опорної стійки має бути вибрана з урахуванням граничного стану повздовжнього вигину оболонки при зсуві, суміжному з пов'язаною стійкою; див. 5.3.2.6.

(3) The length of engagement should be chosen taking account of the limit state of buckling of the shell in shear adjacent to the engaged column, see 5.3.2.6.

(4) Якщо відособлені опори застосовуються без кільцевої балки, ребро жорсткості над кожною опорною стійкою має бути:

а) або пов'язано з оболонкою до звісу даху;

б) або пов'язано на відстані не менше L_{min}, яке визначається з виразу:

(4) Where discrete supports are used without a ring girder, the stiffener above each support should be either:

a) engaged into the shell as far as the eaves;

b) engaged by a distance not less than L_{min}, determined from:

$$L_{\min} = 0{,}4r\sqrt{\left(\frac{r}{t}\right)\cdot\frac{1}{n\left(n^2-1\right)}} \qquad (5.84)$$

де n кількість опорних стійок, розташованих по периметру кола оболонки.

where n is the number of supports around the shell circumference.

5.4.6.2 *Локальні ребра для введення навантаження на циліндричні стінки*

5.4.6.2 *Local ribs for load introduction into cylindrical walls*

(1) Ребра жорсткості для передачі локального навантаження стінці циліндра повинні мати пропорції, співвимірні

(1) A rib for local load introduction into the wall of a cylinder should be proportioned to transmit thedesign force without localised

розрахунковій силі, що передається без локалізованої безповоротної деформації опори або стінки оболонки.

(2) Довжина зачеплення ребра жорсткості має бути вибрана з урахуванням граничного стану повздовжнього вигину оболонки при зсуві, суміжному з пов'язаною стійкою; див. 5.3.2.6.

(3) При проектуванні ребер жорсткості слід врахувати необхідність утримання кручення ребра, щоб запобігти локальним радіальним деформаціям стінки циліндра. При необхідності для запобігання радіальним деформаціям повинні застосовуватися кільця жорсткості.

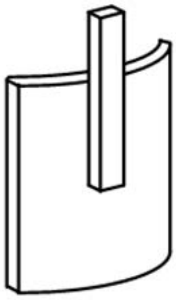
Примітка: Можливі деталі для перенесення навантаження на оболонку за допомогою локальних ребер жорсткості показані на рисунку 5.8.

irreversible deformation to the support or the shell wall.

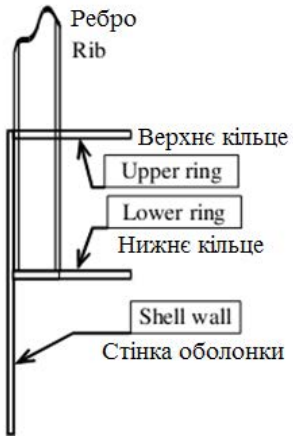
(2) The engagement length of the rib should be chosen taking account of the limit state of buckling of the shell in shear adjacent to the rib, see 5.3.2.6.

(3) The design of the rib should take account of the need for rotational restraint of the rib to prevent local radial deformations of the cylinder wall. Where necessary, stiffening rings should be used to prevent radial deformations.

NOTE: Possible details for load introduction into the shell using local ribs are shown in figure 5.8.



Локальне ребро без кілець, закріплене на стінці циліндра
Local rib without rings attached to cylindrical wall



Локальне ребро з кільцями жорсткості для опори радіальним деформаціям
Local rib with stiffening rings to resist radial displacements

Рисунок 5.8 Типові деталі оснащення для перенесення навантаження
Figure 5.8 Typical details of loading rib attachments

5.4.7 *Анкерне кріплення основи бункера*

(1) При проектуванні анкерного кріплення повинна враховуватися неоднорідність фактичних дій на стінку оболонки в кільцевому напрямі. Особлива увага повинна приділятися високим вимогам до локальних анкерних кріплень, необхідних для опору дії вітру.

5.4.7 *Anchorage at the base of a silo*

(1) The design of the anchorage should take account of the circumferential non-uniformity of the actual actions on the shell wall. Particular attention should be paid to the local high anchorage requirements needed to resist wind action.

Примітка: Сили анкерного кріплення зазвичай недооцінюються, якщо бункер розглядається як консольна балка при загальному вигині.

(2) Інтервал між анкерними кріпленнями не повинен перевищувати значення, що виводиться з врахуванням розрахункових можливостей кільця основи, приведених в 8.5.3.

NOTE: Anchorage forces are usually underestimated if the silo is treated as a cantilever beam under global bending.

(2) The separation between anchorages should not exceed the value derived from consideration of the base ring design, given in 8.5.3.

(3) Якщо не виконувати уточнені розрахунки, використовуючи числовий аналіз, проект анкерного кріплення повинен мати адекватний опір, щоб витримати локальну величину під'ємної сили $n_{x,Ed}$ на одиницю кола:

(3) Unless a more thorough assessment is made using numerical analysis, the anchorage design should have a resistance adequate to sustain the local value of the uplifting force $n_{x,Ed}$ per unit circumference:

$$n_{x,Ed} = p_{n,Edw}\left(\frac{L^2}{2r}\right)\left[C_1+\sum_{m=2}^{M} m^2 C_m\left\{1-\frac{3}{4}\left(\frac{a_1}{a_2+a_3}\right)\right\}\right] \tag{5.85}$$

$$a_1 = 1+10{,}4\left(\frac{r}{mL}\right)^2 \tag{5.86}$$

$$a_2 = 1+7{,}8\left(\frac{r}{mL}\right)^2 \tag{5.87}$$

$$a_3 = 3\frac{r^3 t}{I_z}\left(\frac{r}{L}\right)^3\left(\frac{1}{m^4\left(m^2-1\right)^2}\right) \tag{5.88}$$

де:

$p_{n,Edw}$ розрахункове значення точки тиску гальмування під впливом вітру;

L загальна висота стінки циліндричної оболонки;

t середня товщина стінки циліндричної оболонки;

I_z момент інерції перерізу кільця на верхній кромці циліндра відносно його вертикальної осі (вигину в кільцевому напрямі);

C_m коефіцієнти гармонійного розподілу вітрового навантаження по колу

M вищій кофіцієнт гармоніки при розподілі вітрового навантаження.

where:

$p_{n,Edw}$ is the design value of the stagnation point pressure under wind;

L isthe total height of the cylindrical shell wall;

t is the mean thickness of the cylindrical shell wall;

I_z is the second moment of area of the ring at the upper edge of the cylinder about its vertical axis (circumferential bending);

C_m are the harmonic coefficients of the wind pressure distribution around the circumference

M is the highest harmonic in the wind pressure distribution.

Примітка: Значення коефіцієнтів гармонійного розподілу вітрового навантаження C_m, які пов'язані з особливими умовами, можуть бути задані в Національному додатку. Далі приведені прості рекомендації для бункерів класів наслідків 1 і 2 : M= 4, C_1 = +0,25, C_2 = +1,0, C_3 = +0,45 і C_4 = −0.15. Для бункерів класу наслідків 3 рекомендуються більш точні коефіцієнти розподілу, які представлені в Додатку С, а саме: M = 4 для відособлених бункерів і M = 10 для бункерів, розташованих групами.

NOTE: The values for the harmonic coefficients of wind pressure C_m relevant to specific conditions maybe chosen by the National Annex. The following gives a simple recommendation for Class 1 and 2 silos: M= 4, C_1 = +0,25, C_2 = +1,0, C_3 = +0,45 and C_4 = −0.15. For Class 3 silos, the more precise distributions with M= 4 for isolated silos and M= 10 for grouped silos given in Annex *C* are recommended.

5.5 Деталізація отворів в циліндричних стінках

5.5.1 *Загальні положення*

(1) Отвори в стінці бункера мають бути посилені вертикальними і горизонтальними ребрами жорсткості, які закріплюються поряд з отвором. Якщо між отвором і ребром жорсткості прокладений будь-який матеріал із стінки оболонки, при розрахунках його слід ігнорувати.

5.5.2 *Прямокутні отвори*

(1) Розмір посилення по периметру прямокутного отвору у вертикальному напрямі (див. рисунок 5.9) має бути таким, щоб площа поперечного перерізу ребер жорсткості була не менша за площу поперечного перерізу вирізаної частини стінки, але не перевищувала це значення більш ніж в два рази.

(2) Розмір посилення по горизонталі має бути таким, щоб площа поперечного перерізу ребер жорсткості була не менше площі поперечного перерізу вирізаної частини стінки.

(3) Згинна жорсткість ребер жорсткості, розташованих під прямим кутом до напряму результуючої мембранного напруження, повинна бути вибрана так, щоб відносне зміщення δ стінки оболонки у напрямі результуючої напруження на центральній лінії отвору і напруження у зв'язку з наявністю отвору було не більше за величину δ_{max}, яка визначається виразом:

$$\delta_{max} = k_{d1}\sqrt{\frac{t}{r}}\cdot d \qquad (5.89)$$

де d ширина отвору, що вимірюється перпендикулярно напряму результуючої напруження.

Примітка: Значення k_{d1} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення

5.5 Detailing for openings in cylindrical walls

5.5.1 *General*

(1) Openings in the wall of the silo should be reinforced by vertical and horizontal stiffeners adjacent to the opening. If any material of the shell wall lies between the opening and the stiffener, it should be ignored in the calculation.

5.5.2 *Rectangular openings*

(1) The vertical reinforcement around a rectangular opening (see figure 5.9) should be dimensioned so that the cross-sectional area of the stiffeners is not less than the cross-sectional area of the wall that has been lost, but not more than twice this value.

(2) The horizontal reinforcement should be dimensioned so that the cross-sectional area of the stiffeners is not less than the cross-sectional area of the wall that has been lost.

(3) The flexural stiffness of the stiffeners orthogonal to the direction of the membrane stress resultant should be chosen so that the relative displacement δ of the shell wall in the direction of the stress resultant on the centreline of the opening and resulting from the presence of the opening is not greater than δ_{max}, determined as:

where d is the width of the opening normal to the direction of the stress resultant.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_{d1}.The value k_{d1} = 0,02 is recommended.

k_{d1} = 0,02.

(4) Довжина посилення вертикальними ребрами жорсткості повинна виступати за верхню і нижню межі отвору не менше ніж на величину $2\sqrt{rt}$.

(4) The vertical reinforcing stiffeners should extend not less than $2\sqrt{rt}$ above and below the opening.

(5) Оболонка має бути запроектована так, щоб протистояти локальному повздовжньому вигину стінки в зоні закінчення ребер жорсткості. При цьому повинні застосовуватися положення 5.4.5 і 5.4.6 стосовно локальних навантажень.

(5) The shell should be designed to resist local buckling of the wall adjacent to the termination of the stiffeners using the provisions of 5.4.5 and 5.4.6 for local loads.

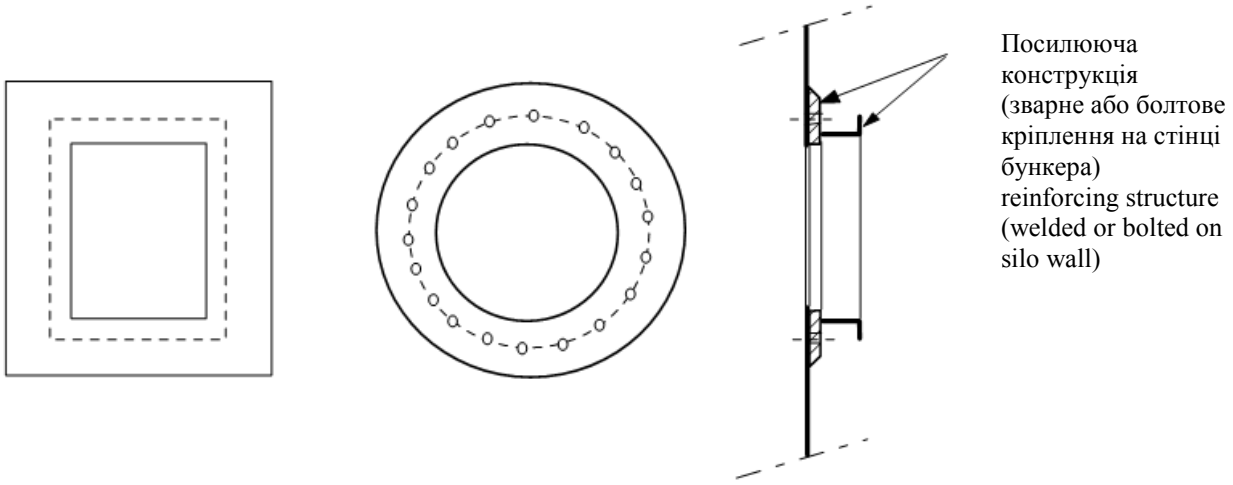


Рисунок 5.9 Типові схеми посилення отворів в стінках бункера

Figure 5.9 Typical stiffening arrangements for openings in silo walls

5.6 Граничні експлуатаційні стани

5.6.1 *Основа*

(1) Граничні експлуатаційні стани сталевих циліндричних бункерів з листовою обшивкою стінок слід сприймати як:
– деформації або відхилення, які несприятливо впливають на ефективне використання конструкції;
– деформації, відхилення, вібрації або коливання, які шкодять як несучим, елементам конструкції, так і не несучим.

(2) Деформації, відхилення і вібрації мають бути обмежені, щоб задовольнити вказаним вище критеріям.

5.6 Serviceability limit states

5.6.1 *Basis*

(1) The serviceability limit states for steel silo cylindrical plated walls should be taken as:

− deformations or deflections that adversely affect the effective use of the structure;

− deformations, deflections, vibration or oscillation that causes damage to both structural and non-structural elements.

(2) Deformations, deflections and vibrations should be limited to meet the above criteria.

(3) Конкретні граничні значення, що відповідають визначеній області застосування, повинні бути погоджені між проектною організацією, замовником і наглядовим органом з урахуванням сфери застосування і природи твердих матеріалів, що зберігаються.

(3) Specific limiting values, appropriate to the intended use, should be agreed between the designer, the client and the relevant authority, taking account of the intended use and the nature of the solids to be stored.

5.6.2 *Відхилення*

(1) Граничне значення загального відхилення по горизонталі має бути прийняте за:

$$w_{\max} = k_{d2}\, H \tag{5.90}$$

де H висота конструкції, яка вимірюється від фундаменту до даху.

Примітка: Значення k_{d2} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_{d2} = 0{,}02$.

5.6.2 *Deflections*

(1) The limiting value for global horizontal deflection should be taken as:

$$w_{\max} = k_{d2}\, H \tag{5.90}$$

where H is the height of the structure measured from the foundation to the roof.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_{d2}.The value $k_{d2} = 0{,}02$ is recommended.

(2) Граничне значення локального відхилення за радіусом (відхилення поперечного перерізу від кола) під впливом вітру повинно бути прийняте за найменше з:

$$w_{r,\max} = k_{d3}\, r \tag{5.91}$$

$$w_{r,\max} = k_{d4}\, t \tag{5.92}$$

де t локальна товщина найтоншої частини в стінці оболонки.

Примітка: Значення k_{d3} і k_{d4} можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендуються значення $k_{d3} = 0{,}05$ і $k_{d4} = 20$.

(2) The limiting value for local radial deflection (departure of cross-section from circular) under wind should be taken as the lesser of:

$$w_{r,\max} = k_{d3}\, r \tag{5.91}$$

$$w_{r,\max} = k_{d4}\, t \tag{5.92}$$

where t is the local thickness of the thinnest part of the shell wall.

NOTE: The National Annex may choose the values of k_{d3} and k_{d4}. The values $k_{d3} = 0{,}05$ and $k_{d4} = 20$ are recommended.

6 ПРОЕКТУВАННЯ КОНІЧНИХ БУНКЕРІВ-ХОПЕРІВ

6.1 Основа

6.1.1 *Загальні положення*

(1) Конічні хопери повинні мати такі пропорції, щоб виконувалися основні вимоги до розрахунку крайніх граничних станів, що містяться у розділі 2.

(2) Оцінка безпеки конічної оболонки повинна проводитися відповідно до положень стандарту EN 1993-1-6.

6.1.2 *Проектування стінок хопера*

(1) Конічні стінки хопера повинні перевірятися на:
− опір розриву під впливом внутрішнього тиску і тертя об стінки;
− опір локальній текучості при вигині в перехідній зоні;
− опір втомному руйнуванню;
− опір швів (з'єднань);
− опір втраті стійкості при поперечних навантаженнях, викликаних завантажувальними пристроями і оснащенням;
− локальні дії.

(2) Стінка оболонки повинна задовольняти положенням стандарту EN 1993-1-6, за виключенням тих випадків, коли 6.3 – 6.5 забезпечують умови, які задовольняють положенням цього стандарту.

(3) Правила, що містяться в 6.3 – 6.5, можуть застосовуватися до хоперів з неповними кутами у діапазоні $0° < \beta < 70°$.

(4) В хоперах класу наслідків 1 за граничними станами циклічної пластичності і втоми можна нехтувати за умови, що будуть виконані дві наступні умови:
а) Розрахунок розриву в перехідній зоні виконаний з використанням вдосконаленого часткового коефіцієнта $\gamma_{M0} = \gamma_{M0g}$.

6 DESIGN OF CONICAL HOPPERS

6.1 Basis

6.1.1 *General*

(1) Conical hoppers should be so proportioned that the basic design requirements for ultimate limit states given in section 2 are satisfied.

(2) The safety assessment of the conical shell should be conducted using the provisions of EN 1993-1-6.

6.1.2 *Hopper wall design*

(1) The conical wall of the hopper should be checked for:
− resistance to rupture under internal pressure and wall friction;
− resistance to local yielding in bending at the transition;
− resistance to fatigue failure;
− resistance of joints (connections);
− resistance to buckling under transverse loads from feeders and attachments;

− local effects.

(2) The shell wall should satisfy the provisions of EN 1993-1-6, except where 6.3 to 6.5 provide conditions that are deemed to satisfy the provisions of that standard.

(3) The rules given in 6.3 to 6.5 may be used for hoppers with hopper half angles in the range $0° < \beta < 70°$.

(4) For hoppers in Consequence Class 1, the cyclic plasticity and fatigue limit states may be ignored, provided that both the following two conditions are met:
a) The design for the rupture at the transition junction should be carried out using an enhanced partial factor of $\gamma_{M0} = \gamma_{M0g}$.

б) Поблизу перехідної зони хопера не застосовуються локальні меридіальні ребра жорсткості або опори.

Примітка: Значення γ_{M0g}. може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення γ_{M0g}.= 1,4.

b) No local meridional stiffeners or supports are attached to the hopper wall near the transition junction.

NOTE: The National Annex may choose the value of γ_{M0g}. The value γ_{M0g} = 1,4 is recommended.

6.2 Відмінності між формами оболонок бункера

(1) Стінка хопера, виготовлена з плоского сталевого катаного листа, називається ізотропною.

(2) Стінка хопера з ребрами жорсткості, прикріпленими зовні, називається зовнішнім посиленням.

(3) Хопер з більш ніж одним розвантажувальним отвором називається багатоканальним.

(4) Хопер, який є частиною бункера з відособленими опорними стійками або кронштейнами, повинен називатися окремо опертим, попри те, що відособлені опори не розташовані безпосередньо під хопером.

6.2 Distinctions between hopper shell forms

(1) A hopper wall constructed from flat rolled steel sheet should be termed 'isotropic'.

(2) A hopper wall with stiffeners attached to the outside should be termed 'externally stiffened'

(3) A hopper with more than one discharge orifice should be termed 'multiple outlet'

(4) A hopper which forms part of a silo supported on discrete column or bracket supports should be termed 'discretely supported', even though the discrete supports are not directly beneath the hopper.

6.3 Опір конічних бункерів-хоперів

6.3.1 *Загальні положення*

(1) Конічний хопер повинен задовольняти положенням стандарту EN 1993-1-6. У якості альтернативи задовільні результати можуть бути отримані шляхом оцінки розрахункового опору відповідно до 6.3.

(2) Особливу увагу необхідно звернути на можливі критичні навантаження в різних частинах хопера в умовах баричного поля під впливом наповнення або розвантаження.

(3) Результуючі напруження хопера, що виникають в корпусі, як правило, можна визначити за допомогою мембранної теорії оболонок.

Примітка: Додаткова інформація, пов'язана з

6.3 Resistance of conical hoppers

6.3.1 *General*

(1) The conical hopper should satisfy the provisions of EN 1993-1-6. Alternatively, these may be deemed to be satisfied using the assessments of the design resistance given in 6.3.

(2) Special attention should be paid to the possibility that different parts of the hopper can be critically loaded under the pressure patterns of either filling or discharge actions.

(3) The stress resultants arising in the body of the hopper may generally be found using the membrane theory of shells.

NOTE: Additional information relating to the pressure

вірогідним виникненням баричних полів, і з результуючими напруженнями в корпусі хопера згідно мембранної теорії, представлена в Додатку В.

patterns which may occur and the membrane theory stress resultants in the hopper body is given in Annex B.

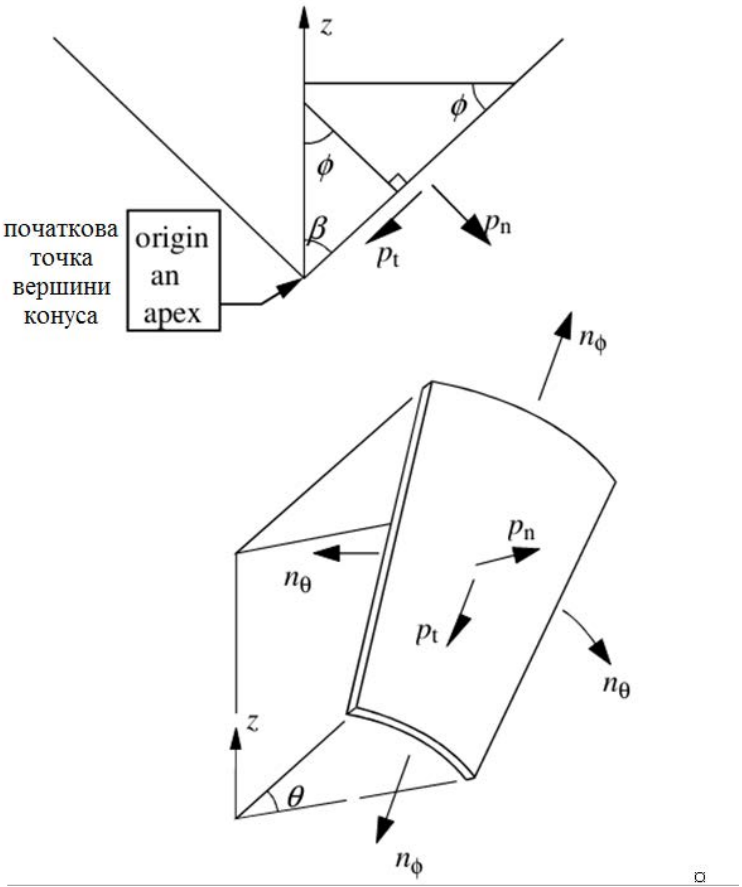


Рисунок 6.1 Сегмент оболонки хопера
Figure 6.1 Hopper shell segment

6.3.2 *Ізотропні хопери без ребер жорсткості на зварних або болтових з'єднаннях*

6.3.2 *Isotropic unstiffened welded or bolted hoppers*

6.3.2.1 *Загальні положення*

(1) Конічний хопер повинен розглядатися як конструкція оболонки, в якій враховується взаємозв'язок між меридіальною і периферичною дією при навантаженні на кріплення.

6.3.2.1 *General*

(1) A conical hopper should be treated as a shell structure, recognising the coupling of meridional and circumferential actions in supporting loads.

6.3.2.2 *Механізм пластичності або розриви конструкцій хопера*

(1) Розрахунки з метою запобігання розриву повинні враховувати, що хопер може піддаватися дії різних баричних полів, і змінам цих полів в стінці. Оскільки початкова точка руйнування вершини конуса при розриві може легко

6.3.2.2 *Plastic mechanism or rupture in the hopper body*

(1) The design against rupture should recognise that the hopper can be subject to different patterns and changing patterns of pressures on the wall. Because failure by rupture can easily propagate and is generally not ductile, every point in the hopper should

поширюватися і, як правило, не є в'язким, кожна точка хопера має бути здатною протистояти найтяжчим розрахунковим умовам.

be able to resist the most severe design condition.

(2) Зварні або болтові з'єднання, спрямовані вниз уздовж меридіальної лінії конічного хопера, повинні мати в кожній точці пропорції, які витримають позаграничні мембранні сили, що виникають в результаті розподілу тиску, як при наповнені, так і при розвантажені.

(2) Welded or bolted joints running down the meridian within the conical hopper should be proportioned at each point to sustain the worst membrane forces arising from either the filling or the discharge pressure distribution.

(3) Зварні або болтові з'єднання, спрямовані вздовж кола хопера, повинні мати пропорції, здатні витримати максимальну загальну вагу твердих матеріалів, яка може бути прикладена нижче такого з'єднання.

Примітка: Ця величина зазвичай визначається за допомогою розподілу тиску при наповненні; див. EN 1991-4.

(3) Welded or bolted joints running around the hopper circumference should be proportioned to sustain the maximum total weight of solids that can be applied below that point.

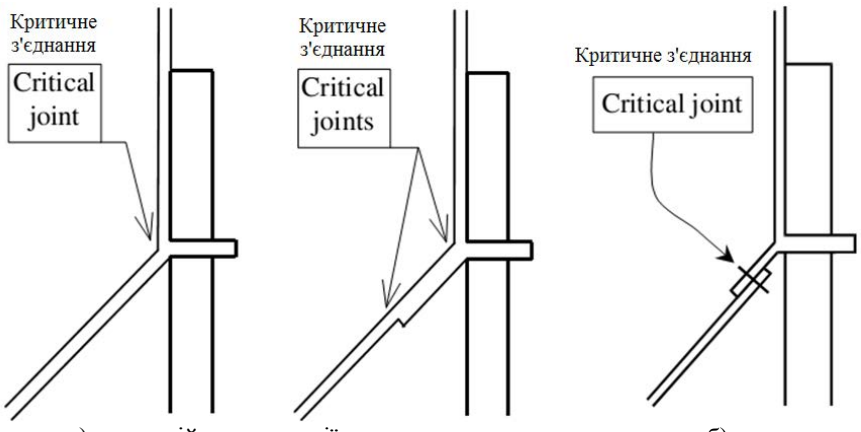
NOTE: This is generally defined by the filling pressure distribution: see EN 1991-4.

6.3.2.3 *Розриви в перехідній зоні*

6.3.2.3 *Rupture at the transition junction*

(1) Круговий шов між хопером і перехідним з'єднанням (див. рисунок 6.2) має бути розрахований так, щоб витримати максимальне загальне меридіальне навантаження, яке повинен витримати хопер, щоб забезпечити опору з допуском на можливу і неминучу неоднорідність навантажень.

(1) The circumferential joint between the hopper and the transition junction, see Figure 6.2, should be designed to carry the maximum total meridional load that the hopper can be required to support, allowing for possible unavoidable non-uniformities.



а) у зварній конструкції;
a) in welded construction

б) у конструкції на болтах
b) in bolted construction

Рисунок 6.2 Перехідне з'єднання хопера: вірогідність розриву
Figure 6.2 Hopper transition joint: potential for rupture

(2) Якщо розглядати тільки навантаження, викликані силою тяжіння і самоплинністю, твердих матеріалів, що зберігаються, меридіональну силу на одиницю кола $n_{\upsilon h,Ed,s}$, що виникає в результаті симетричного тиску, визначеного в стандарті EN 1991-4, яке має бути перенесене через перехідне з'єднання, слід розраховувати за допомогою загальної рівноваги. Тоді розрахункове значення локальної меридіальної сили на одиницю кола $n_{\upsilon h,Ed}$, що допускає можливу нерівномірність навантаження, буде отримано з виразу:

(2) Where the only loading under consideration is gravity and flow loading from the stored solid, the meridional force per unit circumference $n_{\upsilon h,Ed,s}$ caused by the symmetrical pressures defined in EN 1991-4 that must be transmitted through the transition joint should be evaluated using global equilibrium. The design value of the local meridional force per unit circumference $n_{\upsilon h,Ed}$, allowing for the possible non-uniformity of the loading, should then be obtained as

$$n_{\upsilon h,Ed} = g_{asym}\, n_{\upsilon h,Ed,s} \tag{6.1}$$

де:

$n_{\upsilon h,Ed,s}$ розрахункове значення меридіальної мембранної сили на одиницю кола у вершині хопера, отримане на підставі припущення, що навантаження на хопер абсолютно симетричні;

g_{asym} коефіцієнт збільшення асиметричного напруження.

where:

$n_{\upsilon h,Ed,s}$ is the design value of the meridional membrane force per unit circumference at the top of the hopper obtained assuming the hopper loads are entirely symmetrical;

g_{asym} is the unsymmetrical stress augmentation factor.

Примітка: Вирази для $n_{\upsilon h,Ed,s}$ містяться в Додатку B. Значення g_{asym}. може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення g_{asym}.= 1,2.

NOTE: Expressions for $n_{\upsilon h,Ed,s}$ may be found in Annex B. The National Annex may choose the value of g_{asym}. The value g_{asym} = 1,2 is recommended.

(3) У бункерах класу наслідків 2 розрахунок вигину в області пружної деформації повинен виконуватися на прикладі хопера, на який впливають інші навантаження, витікаючі від відокремлених опор, завантажувальних пристроїв, прикріплених елементів, неоднорідних тисків на хопер тощо. Такий аналіз повинен визначити максимальне локальне значення меридіальної сили на одиницю кола, яке має бути передане через хопер перехідному з'єднанню.

(3) For silos in Consequence Class 2, an elastic bending analysis should be made of the hopper where other loads from discrete supports, feeders, attached members, non-uniform hopper pressures etc. are involved. This analysis should determine the maximum local value of the meridional force per unit circumference to be transmitted through the hopper to transition junction joint.

(4) Розрахунковий опір хопера в перехідному з'єднанні $n_{\upsilon h,Rd}$ має бути прийнятий за:

(4) The design resistance of the hopper at the transition joint $n_{\upsilon h,Rd}$ should be taken as:

$$n_{\upsilon h,Rd} = k_r\, t\, f_u / \gamma_{M2} \tag{6.2}$$

де f_u границя міцності на розрив.

where f_u is the tensile strength.

Примітка: Значення k_r може бути задане в

NOTE: The National Annex may choose the value of

Національному додатку. Рекомендується значення $k_r = 0{,}90$.

6.3.2.4 *Механізм пластичності при зміні товщини або в перехідному з'єднанні*

(1) Опір хопера при врахуванні пластичності повинен оцінюватися в показниках локального значення результуючої меридіального мембранного напруження n_υ на верхній межі конуса або в точці зміни товщини листа.

(2) Розрахунковий опір $n_{\upsilon,Rd}$ визначається за виразом:

k_r. The value $k_r = 0{,}90$ is recommended.

6.3.2.4 *Plastic mechanism at thickness changes or at the transition*

(1) The plastic mechanism resistance of the hopper should be evaluated in terms of the local value of meridional membrane stress resultant n_υ at the upper edge of the cone or at a change of plate thickness.

(2) The design resistance $n_{\upsilon,Rd}$ should be determined from:

$$n_{\varphi,Rd} = \left(\frac{rtf_y}{r - 2{,}4\sqrt{\frac{rt}{\cos\beta}} \cdot \sin\beta} \right) \left(\frac{0{,}91\mu + 0{,}27}{\mu + 0{,}15} \right) / \gamma_{M0} \qquad (6.3)$$

де:

t локальна товщина стінки;

r радіус у вищій точці механізму пластичності (у вершині хопера або у верхній точці зміни товщини листа);

β неповний кут хопера; див. рисунок 6.1;

μ коефіцієнт тертя стінки хопера.

where:

t is the local wall thickness;

r is the radius at the top of the plastic mechanism (hopper top or change of plate thickness);

β is the hopper half angle, see figure 6.1;

μ is the wall friction coefficient for the hopper.

(3) В усіх критичних точках конструкції розрахункове напруження повинне задовольняти наступній умові:

(3) At each critical point in the structure, the design stresses should satisfy the condition:

$$n_{\upsilon,Ed} \le n_{\upsilon,Rd} \qquad (6.4)$$

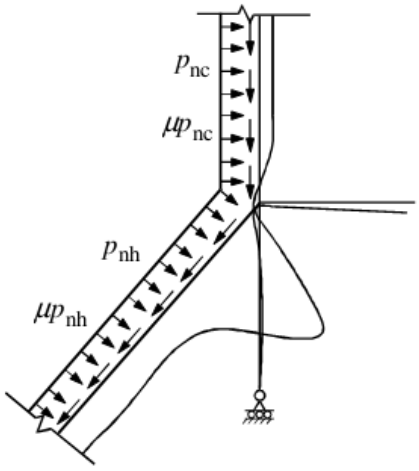


Рисунок 6.3 Пластичне руйнування конічного хопера
Figure 6.3 Plastic collapse of conical hopper

6.3.2.5 *Локальний згин в зоні перехідного з'єднання*

6.3.2.5 *Local flexure at the transition*

(1) Щоб уникнути циклічної пластичності і втомного руйнування проект хопера повинен мати стійкість до критичного локального вигину в його вершині, яке може виникнути в результаті дії чинників, що впливають як на сумісність зовнішніх впливів, так і на стан рівноваги.

(1) To avoid cyclic plasticity and fatigue failures, the hopper should be designed to resist the severe local flexure at the top of the hopper that arises from both compatibility and equilibrium effects.

(2) В проектах бункерів класу наслідків 1 цією вимогою можна нехтувати.

(2) This requirement may be ignored for silos of Consequence Class 1.

(3) За відсутності аналізу конструкції методом скінченних елементів, значення локального напруження при вигині у вершині хопера повинне оцінюватися з урахуванням наступної процедури.

(3) In the absence of a finite element analysis of the structure, the value of the local bending stress at the top of the hopper should be assessed using the following procedure.

(4) Ефективна радіальна сила $F_{e,Ed}$ і момент $M_{e,Ed,}$ що впливають на перехідне кільце, повинні визначатися, виходячи з таких виразів:

(4) The effective radial force $F_{e,Ed}$ and moment $M_{e,Ed}$ acting on the transition ring should be determined from:

$$F_{e,Ed} = n_{\upsilon h,Ed} \sin\beta - F_h - F_c \quad (6.5)$$

$$M_{e,Ed} = F_c\, x_c - F_h\, x_h \quad (6.6)$$

при with:

$$F_c = 2\, x_c\, p_{nc} \quad (6.7)$$

$$F_h = 2\, x_h\, (0{,}85 - 0{,}15\ \mu\cot\beta)\, p_{nh} \quad (6.8)$$

$$x_c = 0{,}39\sqrt{r t_c} \quad (6.9)$$

$$x_h = 0{,}39\sqrt{\frac{r t_h}{\cos\beta}} \quad (6.10)$$

де (див. рисунок 8.4) :

t_h локальна товщина стінки хопера;

t_c локальна товщина стінки циліндра в зоні перехідного з'єднання;

r радіус перехідного з'єднання (у верхній частині хопера);

β половиний кут у вершині хопера;

μ коефіцієнт тертя стінки хопера;

$n_{\upsilon h,Ed}$ розрахункове значення результуючої меридіального мембранного напруження у вершині хопера;

p_{nh} локальна величина нормального тиску на хопер безпосередньо під перехідним з'єднанням;

p_{nc} локальна величина нормального тиску на циліндр безпосередньо над перехідним з'єднанням.

where (see figure 8.4):

t_h is the hopper local wall thickness;

t_c is the local wall thickness of the cylinder at the transition junction;

r isthe radius of the transition junction (top of the hopper);

β is the hopper apex half angle;

μ is the wall friction coefficient for the hopper;

$n_{\upsilon h,Ed}$ is the design value of the meridional membrane stress resultant at the top of the hopper;

p_{nh} is the local value of normal pressure on the hopper just below the transition;

p_{nc} is the local value of normal pressure on the cylinder just above the transition.

(5) Локальне згинне напруження

(5) The local bending stress $\sigma_{b\upsilon h,Ed}$ at the

$\sigma_{b\varphi h,Ed}$ у верхній частині хопера визначається наступним чином:

top of the hopper should be determined from:

$$\sigma_{b\varphi h,Ed} = \left(\frac{6}{\Delta}\right)\{(a_2 - 2a_1\eta)M_{e,Ed} - \rho(a_3 - a_2\eta)F_{e,Ed}\} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right)F_{e,Ed}x_h \quad (6.11)$$

при with:

$$\Delta = 2a_1a_3 - a_2{}^2 \quad (6.12)$$

$$\rho = 0{,}78\sqrt{r} \quad (6.13)$$

$$\eta = \sqrt{t_h \cos\beta} \quad (6.14)$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos\beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} \quad (6.15)$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 \quad (6.16)$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2}\sqrt{\cos\beta} \quad (6.17)$$

де:

t_h локальна товщина стінки хопера;

t_c локальна товщина стінки циліндра в зоні перехідного з'єднання;

t_s локальна товщина стінки юбки нижча перехідного з'єднання;

A_{ep} площа поперечного перерізу кільця в зоні перехідного з'єднання (без урахування фактичного впливу суміжних сегментів оболонки);

r радіус перехідного з'єднання (у верхній частині хопера).

where:

t_h is the hopper local wall thickness;

t_c is the local wall thickness of the cylinder at the transition junction;

t_s is the local wall thickness of the skirt below the transition junction;

A_{ep} is the cross-sectional area of the ring at the transition junction (without any effective contributions from the adjacent shell segments);

r is the radius of the transition junction (top of the hopper).

6.3.2.6 *Хопери як частина бункера, опертого на відособлені опори*

(1) Якщо бункер спирається на відособлені опори або пояси, відносна жорсткість перехідної кільцевої балки, стінки циліндра і хопера повинні враховуватися при оцінці неоднорідності меридіальних мембранних напружень в хопері.

(2) У бункерах класу наслідків 1 цією вимогою можна нехтувати.

(3) Проект хопера повинен забезпечувати опір найвищого локального меридіального напруження у верхній частині хопера (суміжною з опорою) відповідно до 6.3.2.3 і 6.3.2.4.

6.3.2.6 *Hoppers that are part of a silo resting on discrete supports*

(1) If the silo is supported on discrete supports or columns, the relative stiffness of the transition ringgirder, cylinder wall and hopper should be taken into account when assessing the non-uniformity of the meridional membrane stresses in the hopper.

(2) This requirement may be ignored for silos of Consequence Class 1.

(3) The hopper should be designed to sustain the highest local value of meridional tension at the hopper top (adjacent to a support) according to 6.3.2.3 and 6.3.2.4.

6.3.2.7 *Повздовжній згин в хоперах*

(1) У бункерах класу наслідків 1 цим критерієм можна нехтувати.

(2) Хопер повинен оцінюватися на

6.3.2.7 *Buckling in hoppers*

(1) This criterion may be ignored for silos of Consequence Class 1.

(2) The hopper should be assessed for its

опір руйнуванню при повздовжньому вигині внаслідок горизонтальних дій, витікаючих від завантажувальних пристроїв і прикріплених конструкцій, чи таких, що виникають в результаті асиметричних дій у вертикальному напрямі.

resistance to buckling failure as a consequence of horizontal actions from feeders or attached structures, or as a result of unsymmetrical vertical actions.

(3) Розрахунковий опір повздовжньому вигину $n_{\upsilon h,Rd}$ у верхній частині хопера повиннен визначатись на підставі виразу:

(3) The design buckling resistance $n_{\upsilon h,Rd}$ at the top of the hopper should be determined from:

$$n_{\upsilon h,Rd} = 0{,}6\alpha_{xh} E\left(\frac{t_h^2}{r}\right)\cos\beta / \gamma_{M1} \qquad (6.18)$$

де:

α_{xh} коефіцієнт чутливості до пластичної деформації при повздовжньому вигині;

t_h локальна товщина стінки хопера;

r радіус перехідного з'єднання (у верхній частині хопера).

γ_{M1} наведене в 2.9.2, але $n_{\upsilon,Rd}$ не повинно перевищувати $n_{\upsilon,Rd} = t_h f_y / \gamma_{M1}$.

where:

α_{xh} is the elastic buckling imperfection sensitivity factor;

t_h is the hopper local wall thickness;

r isthe radius of the transition junction (top of the hopper).

and

γ_{M1} is given in 2.9.2, but $n_{\upsilon,Rd}$ should not be taken as greater than $n_{\upsilon,Rd} = t_h f_y / \gamma_{M1}$.

Примітка: Значення α_{xh} може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $\alpha_{xh} = 0{,}10$.

NOTE: The National Annex may choose the value of α_{xh}. The value $\alpha_{xh} = 0{,}10$ is recommended.

(4) Меридіальне зусилля у верхній частині хопера повинне задовольняти умові:

(4) The meridional force at the top of the hopper should satisfy the condition:

$$n_{\upsilon h,Ed} \le n_{\upsilon h,Rd} \qquad (6.19)$$

6.4 Розгляд спеціальних конструкцій бункерів

6.4 Considerations for special hopper structures

6.4.1 *Опорні конструкції*

6.4.1 *Supporting structures*

(1) Ефективність відособлених опор, розташованих під бункером, необхідно оцінювати згідно 5.4. Самі підтримуючі конструкції повинні проектуватися відповідно до EN 1993-1-1, а межа між бункером і підтримуючою конструкцією повинна визначатися згідно 1.1(4).

(1) The effect of discrete supports beneath the silo should be treated as set out in 5.4. The supporting structures themselves should be designed to EN 1993-1-1, with the boundary between the silo and supporting structure as defined in 1.1(4).

6.4.2 *Хопер на опорних стійках*

6.4.2 *Column supported hopper*

(1) Якщо корпус самого хопера підтримується відособленими опорами або стійками, які не досягають верхньої кромки хопера, конструкція хопера

(1) If the hopper body itself is supported on discrete supports or columns that do not reach the hopper top edge, the hopper structure should be analysed using the bending

підлягає розрахунку за допомогою теорії вигину оболонок; див. EN 1993-1-6.

(2) Необхідно використовувати адекватні заходи, щоб розподілити реактивні сили опор на хопер.

(3) З'єднання в хопері мають бути розраховані на найвище локальне значення результуючих напружень, які будуть передані через ці з'єднання.

(4) Про оцінку хопера на опір руйнуванню при повздовжньому вигині в зонах, де генерується стискуюче мембранне напруження, див. EN 1993-1-6.

6.4.3 *Асиметричний хопер*

(1) Якщо вісь хопера пролягає не по вертикалі, а похило під кутом ω відносно вертикалі (рисунок 6.4), підвищені меридіальні напруження на стороні з крутим ухилом, які асоціюються з такою геометрією, необхідно оцінити і використати заходи з метою забезпечення адекватного локального меридіального опору.

6.4.4 *Посилені конуси*

(1) Повздовжні балки ребер жорсткості мають бути надійно закріплені анкерами у верхній частини хопера.

(2) Якщо конус хопера посилений меридіальними ребрами жорсткості, в розрахунки необхідно включити ефект сумісності між листовою оболонкою стінки і повздовжніми балками. Ефект напруження в стінці хопера в кільцевому напрямі має бути включений в оцінку сил, що виникають у повздовжніх балках ребер жорсткості і листовій оболонці стінки хопера. При цьому повинен враховуватись ефект Пуассона.

(3) З'єднання листів хопера повинні мати достатні пропорції, щоб протистояти підвищеному напруженню, що виникає в результаті взаємного впливу елементів конструкції.

theory of shells, see EN 1993-1-6.

(2) Adequate provision should be made to distribute the support forces into the hopper.

(3) The joints in the hopper should be designed for the highest local value of stress resultants to be transmitted through them.

(4) The hopper should be assessed for resistance to buckling failure in zones where compressive membrane stresses develop, see EN 1993-1-6.

6.4.3 *Unsymmetrical hopper*

(1) If the axis of the hopper is not vertical, but inclined at an angle ω to the vertical (Fig. 6.4), the increased meridional stresses on the steep side associated with this geometry should be evaluated, and appropriate provision made to provide an adequate local meridional resistance.

6.4.4 *Stiffened cones*

(1) The stringer stiffeners should be adequately anchored at the top of the hopper.

(2) If the hopper cone is stiffened with meridional stiffeners, the effects of compatibility between the wall plate and stringers should be included. The effect of the circumferential tension in the hopper wall should be included in the assessment of the forces in the stringer stiffeners and the hopper wall plate, as affected by the Poisson effect.

(3) The hopper plate joints should be proportioned to resist the increased tension arising from compatibility.

(4) З'єднання між повздовжньою балкою і листовою оболонкою хопера має бути співрозмірне силам, що взаємодіють між ними.

(4) The connection between the stringer and hopper plate should be proportioned for the interaction forces between them.

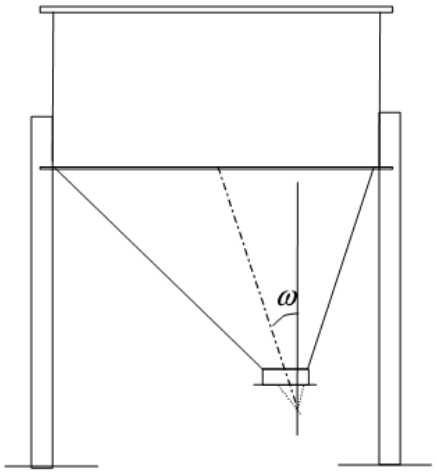


Рисунок 6.4 Асиметричний хопер з півколонами, пов'язаними з циліндром

Figure 6.4 Unsymmetrical hopper with engaged columns in cylinder

6.4.5 *Сегментовані конуси хопера*

(1) Якщо конус хопера складається з декількох сегментів з різними ухилами, відповідні дії сипучих твердих матеріалів на кожен сегмент мають бути розраховані і включені в проект конструкції.
(2) Також необхідно розрахувати локальні напруження в кільцевому напрямі і стискуючі сили при зміні кута нахилу хопера, а також адекватний опір, що забезпечує їх утримання.

(3) Проектні розрахунки повинні включати локальне руйнування внаслідок змін кута нахилу хопера.

6.4.5 *Multi-segment cones*

(1) If a hopper cone is composed of several segments with different slopes, the appropriate bulk solids actions on each segment should be evaluated and included in the structural design.
(2) The local circumferential tensions or compressions at changes in hopper slope should be evaluated, and adequate resistance provided to support them.

(3) The potential for severe local wear at such changes in hopper slope should be included in the design.

6.5 Експлуатаційна придатність граничних станів

6.5 Serviceability limit states

6.5.1 *Основа*

(1) Якщо виникне потреба в критеріях оцінки експлуатаційної придатності хоперів, конкретні граничні значення підлягають узгодженню між проектною

6.5.1 *Basis*

(1) If serviceability criteria are deemed necessary, specific limiting values for hoppers should be agreed between the designer and the client.

організацією і замовником.

6.5.2 *Вібрація*

(1) В проекті мають бути передбачені необхідні заходи, що гарантують, що в час експлуатації хопер не буде схильний до дії надмірних вібрацій.

6.5.2 *Vibration*

(1) Provision should be made to ensure that the hopper is not subject to excessive vibration during operation.

7 ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ КОЛОВОГО КОНІЧНОГО ДАХУ

7.1 Основа

(1) При проектуванні конструкцій даху в розрахунках необхідно розглядати сполученя постійних і тимчасових навантажень, та врахувати випадкові навантаження від сили вітру, снігового покриву і дії часткової розрідженості.

(2) Крім того, проект повинен передбачати можливість виникнення підʻйомних сил на даху від випадкового переповнювання або непередбаченого розрідження твердих матеріалів, що зберігаються.

7.2 Відмінності між формами конструкції даху

7.2.1 *Термінологія*

(1) Конічний оболонковий дах, який утворюють катані листи без опорних балок або кілець називається оболонковим покриттям або безопорним дахом.

(2) Конічний дах, в якому оболонка підтримується за допомогою балок або ростверка, називается кроквяним дахом або дахом що підтримується.

7.3 Опір круглих конічних дахів бункера

7.3.1 *Дахи у вигляді оболонки або безопорні дахи*

(1) Дахи у вигляді оболонкового покриття повинні проектуватися відповідно до вимог EN 1993-1-6. Наступні положення можуть вважатися такими, що задовольняють цим вимогам до конічних дахів, і мають діаметр не більше 5м і кут нахилу даху відносно горизонталі υ не більше 40°.

7 DESIGN OF CIRCULAR CONICAL ROOF STRUCTURES

7.1 Basis

(1) The design of roof structures should take into consideration permanent, transient, imposed, wind, snow, accidental and partial vacuum loads.

(2) The design should also take account of the possibility of upward forces on the roof due to accidental overfilling or unexpected fluidisation of stored solids.

7.2 Distinctions between roof structural forms

7.2.1 *Terminology*

(1) A conical shell roof formed from rolled plates and without supporting beams or rings should be termed a „shell roofʻ or an „unsupported roofʻ.

(2) A conical roof in which sheeting is supported on beams or a grillage should be termed a „framed roofʻ or a „supported roofʻ.

7.3 Resistance of circular conical silo roofs

7.3.1 *Shell or unsupported roofs*

(1) Shell roofs should be designed according to the requirements of EN 1993-1-6, but the following provisions may be deemed to satisfy them for conical roofs with a diameter not greater than 5m and a roof inclination to the horizontal υ not greater than 40°.

(2) Еквівалентні напруження при розрахунку поверхні з критерієм Мізеса, викликані комбінованою згинною і мембранною діями, мають бути всюди обмежені значенням:

(2) The calculated surface von Mises equivalent stresses due to combined bending and membrane action should everywhere be limited to the value:

$$f_{e,Rd} = f_y / \gamma_{M0} \quad (7.1)$$

де:

γ_{M0} визначається з 2.9.2.

where:

γ_{M0} is obtained from 2.9.2.

(3) Критичний зовнішній тиск при повздовжньому вигині $p_{n,Rcr}$ для ізотропного конічного даху повинен обчислюватися за допомогою виразу:

(3) The critical buckling external pressure $p_{n,Rcr}$ for an isotropic conical roof should be calculated as:

$$p_{n,Rcr} = 2{,}65E\left(\frac{t\cos\upsilon}{r}\right)^{2{,}43} \cdot (\tan\upsilon)^{1{,}6} \quad (7.2)$$

де:

r зовнішній радіус даху;

t найменша товщина листа оболонки;

υ нахил конуса відносно горизонтальної площини.

where:

r is the outer radius of the roof;

t is the smallest shell plate thickness;

υ is the slope of the cone to the horizontal.

(4) Розрахунковий зовнішній тиск при повздовжньому вигині повинен визначатися за формулою:

(4) The design buckling external pressure should be determined as:

$$p_{n,Rd} = \alpha_p \, p_{n,Rcr} / \gamma_{M1} \quad (7.3)$$

в якій γ_{M1} визначається з 2.9.2.

Примітка: Значення α_p може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $\alpha_p = 0{,}20$.

in which γ_{M1} is obtained from 2.9.2.

NOTE: The National Annex may choose the value of α_p. The value $\alpha_p = 0{,}20$ is recommended.

(5) Розрахунковий піковий зовнішній тиск на дах, що виникає в результаті дій, визначених в 7.1, повинен задовольняти наступній умові:

(5) The design peak external pressure on the roof arising from the actions defined in 7.1 should satisfy the condition:

$$p_{n,Ed} \le p_{n,Rd} \quad (7.4)$$

7.3.2 *Кроквяні або підтримувані дахи*

(1) Кроквяні або підтримувані дахи, де листова покрівля даху спирається на балки або ростверк, повинні проектуватися відповідно до положень EN 1993-4-2 (резервуари).

7.3.2 *Framed or supported roofs*

(1) Framed or supported roofs, where the roof sheeting is supported on beams or a grillage should be designed according to the provisions of EN 1993-4-2 (Tanks).

7.3.3 *Сполучення звісу даху (з'єднання між дахом і оболонкою)*

(1) Проект сполучення даху з оболонкою і кільцевого посилення в зоні цього з'єднання повинно бути виконане відповідно до положень EN 1993-4-2 (Резервуари).

7.3.3 *Eaves junction (roof to shell junction)*

(1) The roof to shell junction, and the ring stiffener at this junction should be designed according to the provisions of EN 1993-4-2 (Tanks).

8 ПРОЕКТУВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ СПОЛУЧЕНЬ І ПІДТРИМУВАЛЬНИХ КІЛЬЦЕВИХ БАЛОК

8.1 Основа

8.1.1 *Загальні положення*

(1) Сталеве перехідне кільце або кільцева балка повинна мати такі пропорції, щоб були задоволені основні проектні вимоги до крайнього граничного стану, викладені у розділі 2.

(2) Оцінка безпеки кільця повинна виконуватися на підставі вимог EN 1993-1-6, за винятком тих випадків, коли дотримання цих вимог забезпечується даним стандартом.

(3) У бункерах класу наслідків 1 циклічною пластичністю і граничними станами втоми можна нехтувати за умови дотримання нижченаведених умов.

8.1.2 *Проектування кільця*

(1) Кільце або кільцева балка підлягає перевірці на:
− опір межі пластичності при стиску в кільцевому напрямі;
− опір повздовжньому вигину при стиску в кільцевому напрямі;
− опір локальної текучості при напруженнях розтягу або стиску;
− опір локальному руйнуванню вище опор;
− опір крученню;
− опір швів (з'єднань).

(2) Кільцева балка повинна задовольняти положенням EN 1993-1-6, за виключенням тих випадків, коли задоволення положенням цього стандарту забезпечується умовами, вказаними в 8.2 – 8.5.

(3) У бункерах класу наслідків 1 циклічною пластичністю і граничними станами втоми можна нехтувати.

8 DESIGN OF TRANSITION JUNCTIONS AND SUPPORTING RING GIRDERS

8.1 Basis

8.1.1 *General*

(1) A steel transition ring or ring girder should be so proportioned that the basic design requirements for the ultimate limit state given in section 2 are satisfied.

(2) The safety assessment of the ring should be carried out using the provisions of EN 1993-1-6, except where the provisions of this Standard are deemed to satisfy them.

(3) For silos in Consequence Class 1, the cyclic plasticity and fatigue limit states may be ignored, provided that the following conditions are met.

8.1.2 *Ring design*

(1) The ring or ring girder should be checked for:
− resistance to plastic limit under circumferential compression;
− resistance to buckling under circumferential compression;
− resistance to local yielding under tension or compression stresses;

− resistance to local failure above supports;

− resistance to torsion;
− resistance of joints (connections).

(2) The ring girder should satisfy the provisions of EN 1993-1-6, except where 8.2 to 8.5 provide conditions that are deemed to satisfy the provisions of that standard.

(3) For silos in Consequence Class 1, the cyclic plasticity and fatigue limit states may be ignored.

8.1.3 ***Термінологія***

(1) Кільце, призначене тільки для забезпечення опору радіальним складовим сил, витікаючих від хопера, повинне називатися перехідним кільцем.

(2) Кільце, призначене для забезпечення перерозподілу вертикальних сил між різними компонентами (наприклад, між стінкою циліндра і відособленими опорами), повинне називатися кільцевою балкою.

(3) Точка перетину серединної поверхні листової обшивки хопера і серединної поверхні стінки циліндричної оболонки в зоні перехідного з'єднання, що називається центром сполучення, повинна використовуватися для перевірки граничних станів в базовій точці.

(4) Бункер, який не має кільця, що ідентифікується, в зоні переходу (див. рисунок 8.1), має ефективне кільце, що складається з суміжних сегментів оболонки, яке повинне називатися природним кільцем.

(5) Кільчаста пластина, поміщена в зону перехідного сполучення, повинна називатися кільцем з кільчастих пластин; див. рисунок 8.1.

(6) Гарячекатаний сталевий профіль, який використовується в якості кільцевого посилення перехідного сполучення, повинен називатися кільцевим катаним профілем.

(7) Катаний сталевий профіль уздовж периметра кола бункера, що використовується для підтримки оболонки нижче перехідного сполучення повинен називатися катаною кільцевою балкою.

(8) Профіль, виготовлений із сталевих пластин з циліндричними або кільчастими контурами, повинен називатися збірною кільцевою балкою; див. рисунок 8.1.

8.1.3 ***Terminology***

(1) A ring whose purpose is only to provide resistance to radial components of forces from the hopper should be termed a „transition ring".

(2) A ring whose purpose is to provide redistribution of vertical forces between different components (e.g. the cylinder wall and discrete supports), should be termed a „ring girder".

(3) The point of intersection between the middle surface of the hopper plate and the middle surface of the cylindrical shell wall at the transition junction, termed the „joint centre", should be used as the reference point in limit state verifications.

(4) A silo with no identified ring at the transition (see figure 8.1) has an effective ring formed from adjacent shell segments and should be termed a „natural ring".

(5) An annular plate placed at the transition junction should be termed an „annular plate ring", see figure 8.1.

(6) A hot rolled steel section, used as a ring stiffener at the transition should be termed a „rolled section ring".

(7) A rolled steel section rolled around the silo circumference and used to support the shell beneath the transition should be termed a „rolled ring girder".

(8) A section built up from steel plates with cylindrical and annular plate forms should be termed a „fabricated ring girder", see figure 8.1.

8.1.4 *Моделювання з'єднань*

(1) При розрахунках вручну, з'єднання має бути представлене тільки циліндричними і конічними сегментами оболонки і кільчастими пластинами.

(2) Якщо бункер підтримується рівномірно, напруження в кільцевому напрямі в кільчастих пластинах перехідного з'єднання може передбачатися як рівномірне в кожній пластині.

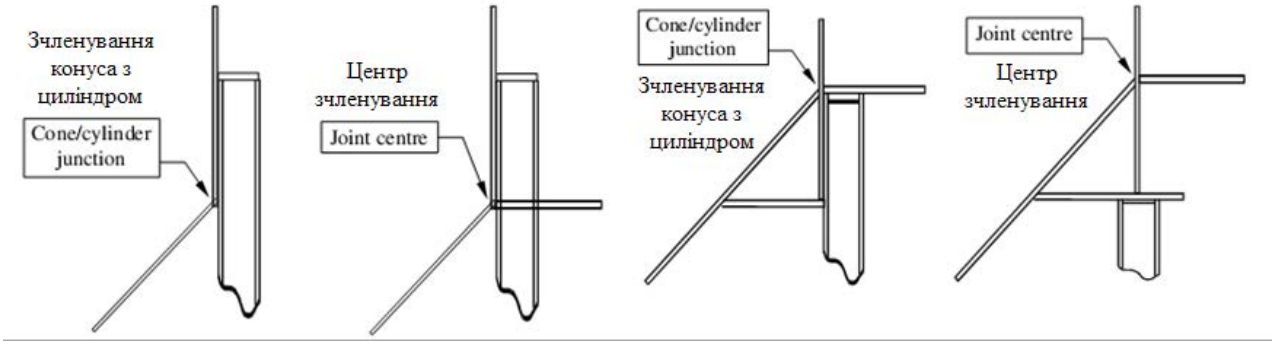
(3) Якщо бункер спирається на відособлені опори або пояси, напруження в кільцевому напрямі в пластинах перехідного з'єднання мають бути прийняті як змінні величини в радіальному напрямі в кожній пластині внаслідок деформуючих навантажень.

8.1.4 *Modelling of the junction*

(1) In hand calculations, the junction should be represented by cylindrical and conical shell segments and annular plates only.

(2) Where the silo is uniformly supported, the circumferential stresses in the annular plates of the junction may be assumed to be uniform in each plate.

(3) Where the silo is supported on discrete supports or columns, the circumferential stresses in the junction plates should be taken to vary radially in each plate as a consequence of warping stresses.



Природне кільце з пов'язаними стійками Natural ring with engaged column	Кільце з кільчастих пластин з пов'язаними стійками Annular plate ring with engaged column	Трикутний короб із стійкою, пов'язаною із юбкою Triangular box with column engaged to skirt	Трикутний короб з концентричною стійкою нижче юбки Triangular box with concentric column beneath skirt

Рисунок 8.1 Приблизні форми кільця
Figure 8.1 Example ring forms

8.1.5 *Обмеження на розміщення кільця*

(1) Зміщення будь-якої кільчастої пластини або кільця по вертикалі відносно центру перехідного сполучення не повинне перевищувати $0{,}2\sqrt{rt}$, де t - це товщина листа циліндра, хіба що для перевірки ефекту ексцентриситету виконується розрахунок вигину оболонки відповідно до EN 1993-1-6.

8.1.5 *Limitations on ring placement*

(1) The vertical eccentricity of any annular plate or ring from the transition joint centre should not be greater than $0{,}2\sqrt{rt}$, where t is the thickness of the cylinder plate, unless a shell bending calculation according to EN 1993-1-6 is carried out to check the effect of the eccentricity.

Примітка: Це правило пов'язане з тим, що розміщення кілець на більшій відстані від перехідного сполучення виявилося неефективним; див. рисунок 8.2.

NOTE: This rule arises from the ineffectiveness of rings placed further than this from the junction, see figure 8.2.

(2) Спрощені правила, приведені в 8.2, застосовуються тільки в тих випадках, коли виконується ця вимога.

(2) The simplified rules in 8.2 apply only where this requirement is met.

8.2 Аналіз сполучення

8.2 Analysis of the junction

8.2.1 *Загальні положення*

8.2.1 *General*

(1) Перехідне сполучення бункера класу наслідків 1 можна розрахувати, використовуючи прості вирази і навантаження з суміжних сегментів оболонки, які виводяться за допомогою мембранної теорії.

(1) For silos in Consequence Class 1, the transition junction may be analysed using simple expressions and loadings from adjacent shell segments derived from membrane theory.

(2) Якщо розрахунки перехідного сполучення виконувати на ЕОМ, вони повинні задовольняти вимогам EN 1993-1-6.

(2) Where a computer calculation of the transition junction is performed, it should satisfy the requirements of EN 1993-1-6.

(3) Якщо розрахунки на ЕОМ не застосовуються і бункер підтримується рівномірно, може бути зроблений аналіз зони перехідного сполучення відповідно до 8.2.2.

(3) Where a computer calculation is not used and the silo is uniformly supported, the analysis of the junction may be undertaken using 8.2.2.

(4) Якщо розрахунки на ЕОМ не застосовуються і бункер підтримується відособленими опорами чи поясами, аналіз перехідного сполучення повинен проводитися відповідно до 8.2.3.

(4) Where a computer calculation is not used and the silo is supported on discrete supports or columns, the analysis of the junction should be undertaken using 8.2.3.

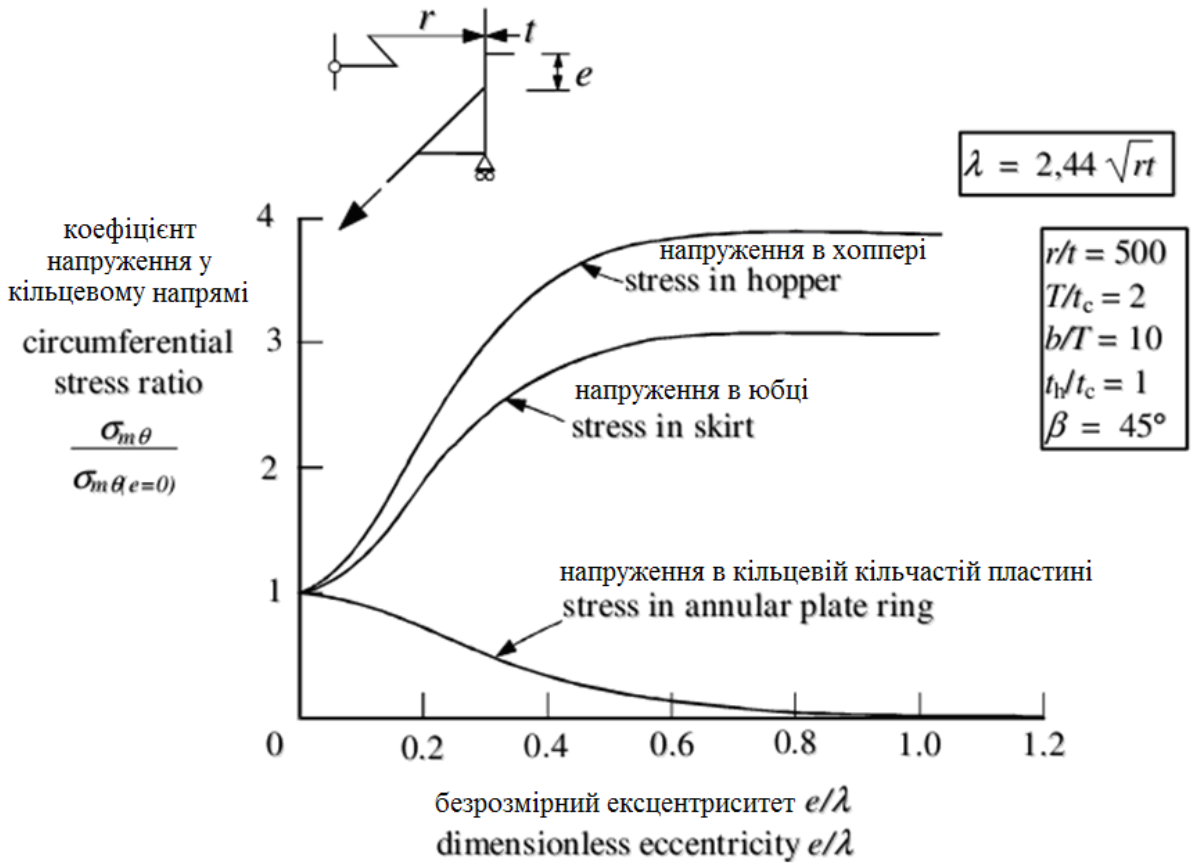


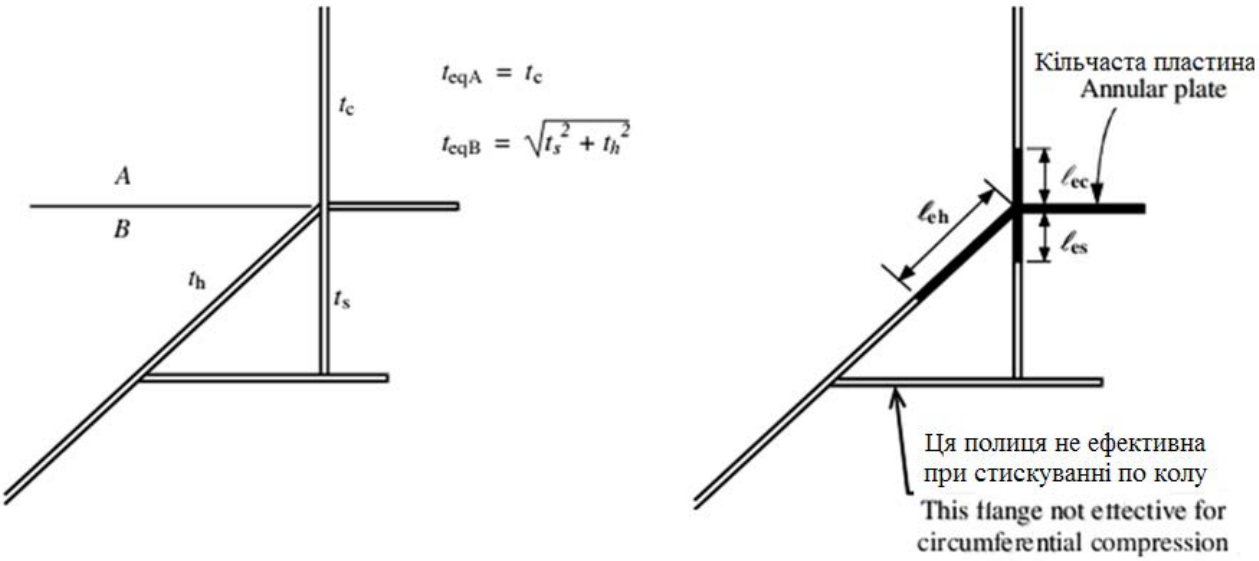
Рисунок 8.2 Розвиток мембранних напружень в кільці і суміжній оболонці, якщо кільце зміщене відносно центру
Figure 8.2 Membrane stresses developed in a ring and adjacent shell when the ring is eccentric

8.2.2 *Перехідні сполучення з однорідною підтримкою*

(1) Ефективний переріз перехідного сполучення повинен оцінюватися таким чином: сегменти оболонки, які сполучаються в центрі з'єднання, мають бути поділені на верхні (група A) і нижні (група B); див. рисунок 8.3(a). Із самого початку усіма сегментами кільчастої пластини на рівні центру сполучення можна нехтувати. Якщо до кільчастої пластини прикріпити вертикальну підпору в іншій радіальній координаті відносно центру сполучення, її, наряду з іншими сегментами, можна розглядати в якості сегменту оболонки; див. рисунок 8.3.

8.2.2 *Uniformly supported transition junctions*

(1) The effective section of the transition junction should be evaluated as follows: the shell segments meeting at the joint centre should be separated into those above (Group A) and those below (Group B), see figure 8.3 (a). All annular plate segments at the level of the joint centre should be initially ignored. Where a vertical leg is attached to the annular plate at a different radial coordinate from the joint centre, it should be treated as a shell segment in the same manner as the others, see figure 8.3.



а) геометрія

a) Geometry

б) ефективність кільцевої балки при стиску у кільцевому напрямі

b) Effective ring beam for circumferential compression

Рисунок 8.3 Ефективний переріз циліндра, хопера і перехідного кільця

Figure 8.3 Effective section of the cylinder / hopper / ring transition

(2) Еквівалентна товщина сегментів t_{eqA} і t_{eqB} в кожній групі визначається, виходячи з наступних виразів:

(2) The equivalent thickness t_{eqA} and t_{eqB} of each group should be determined from:

$$t_{eqA} = \sqrt{\sum_A t^2} \tag{8.1}$$

$$t_{eqB} = \sqrt{\sum_B t^2} \tag{8.2}$$

(3) Співвідношення α-тонших сегментів до товщих сегментів відповідної групи листів повинне визначатися, виходячи з виразу:

(3) The ratio α of the thinner to the thicker equivalent plate group should be determined from:

$$\alpha = \frac{(t_{eq})_{thinner}}{(t_{eq})_{thicker}} \tag{8.3}$$

при with:

$$(t_{eq})_{thinner} = \min(t_{eqA}, t_{eqB}) \tag{8.4}$$

$$(t_{eq})_{thicker} = \max(t_{eqA}, t_{eqB}) \tag{8.5}$$

(4) В одній з двох груп з тоншими листами ефективна довжина кожного сегменту оболонки повинна визначатися виходячи з виразу:

(4) For the thinner of these two groups, the effective length of each shell segment should be determined from:

$$l_{e1} = 0{,}778\sqrt{\frac{rt}{\cos\beta}} \tag{8.6}$$

де β кут між центральною лінією оболонки і осьовою лінією бункера (неповний кут у вершині конуса) для цього листа. Корисна площа поперечного перерізу кожного сегменту оболонки повинна визначатися виходячи з виразу:

where β is the angle between the shell centreline and the silo axis (cone apex half angle) for that plate. The effective cross-sectional area of each shell segment should be determined from:

$$A_{e1} = l_{e1}\, t \tag{8.7}$$

З двох груп, в групі з товщими листами корисна площа поперечного перерізу кожного сегменту оболонки повинна визначатися виходячи з виразу:

For the thicker of these two groups, the effective length of each shell segment should be determined from:

$$l_{e2} = 0{,}389\left[1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3\right]\sqrt{\frac{rt}{\cos\beta}}\,. \tag{8.8}$$

У цій групі корисна площа поперечного перерізу кожного сегменту оболонки повинна визначатися виходячи з виразу:

For this group, the effective cross-sectional area of each shell segment should be determined from:

$$A_{e2} = l_{e2}\, t. \tag{8.9}$$

(5) Корисна площа поперечного перерізу A_{ep} кільчастої пластини, сполученої з вузлом з'єднання через центр сполучення, повинна визначатися виходячи з виразу:

(5) The effective cross-sectional area A_{ep} of the annular plate joining into the junction at the joint centre should be determined from:

$$A_{ep} = \frac{bt_p}{1 + 0{,}8\dfrac{b}{r}}, \tag{8.10}$$

де:

r радіус циліндричної стінки бункера;

b радіальна ширина кільця з кільчастих пластин;

t_p товщина кільця з кільчастих пластин.

where:

r is the radius of the silo cylinder wall;

b is the radial width of the annular plate ring;

t_p is the thickness of the annular plate ring.

(6) Загальна корисна площа A_{et} кільця при підвищенні сили стиску в кільцевому напрямі повинна визначатися виходячи з виразу:

(6) The total effective area A_{et} of the ring in developing circumferential compression should be determined from:

$$A_{et} = A_{ep} + \sum_{i=1}^{\substack{усі_сегменти \\ all_segments}} A_{ei} \tag{8.11}$$

(7) Якщо сполучення складається тільки з циліндра, юбки і хопера (див. рисунок 8.4), загальна корисна площа кільця A_{et} може бути розрахована за допомогою альтернативного виразу:

(7) Where the junction consists only of a cylinder, skirt and hopper (see figure 8.4), the total effective area of the ring A_{et} may be alternatively found from:

$$A_{et} = A_{ep} + 0{,}778\sqrt{r}\left\{t_c^{3/2} + \psi\left(\frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos\beta}} + t_s^{3/2}\right)\right\} \tag{8.12}$$

при with:

$$\psi = 0{,}5\,(1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3) \tag{8.13}$$

$$\alpha = \frac{t_c}{\sqrt{t_s^2 + t_h^2}} \tag{8.14}$$

де:

r радіус циліндричної стінки бункера;

where:

r is the radius of the silo cylinder wall;

t_c товщина стінки циліндра;
t_s товщина листа юбки;
t_h товщина стінки хопера;
A_{ep} корисна площа кільця з кільчастих пластин.

t_c is the thickness of the cylinder;
t_s is the thickness of the skirt;
t_h is the thickness of the hopper;
A_{ep} is the effective area of the annular plate ring.

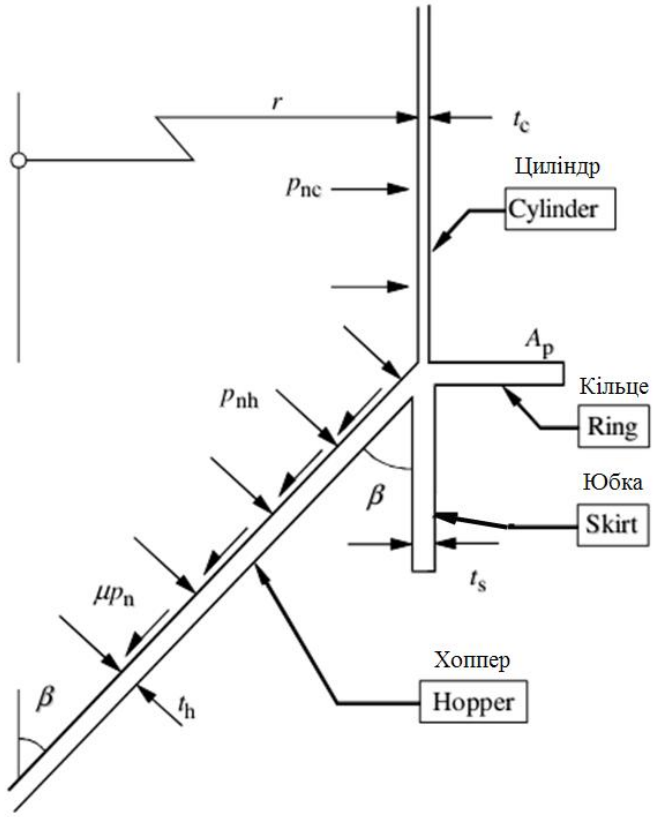


Рисунок 8.4 Представлення простого перехідного з'єднання з кільчастих пластин

Figure 8.4 Notation for simple annular plate transition junction

(8) Якщо в перехідному сполученні використовуються профілі, які мають більш складну геометрію, при оцінці перехідного сполучення повинні вважатися корисними тільки сегменти кільчастої пластини, що задовольняють умові 8.1.5(1).

(8) Where sections of more complex geometry are used at the transition junction, only ring plate segments meeting the condition of 8.1.5(1) should be deemed to be effective in the evaluation of the junction.

(9) Розрахункове значення ефективної сили стиску в кільцевому напрямі $N_{\theta,Ed}$ яка розвивається в сполученні, повинне визначатися виходячи з виразу:

(9) The design value of the effective circumferential compressive force $N_{\theta,Ed}$ developed in the junction should be determined from:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\upsilon h,Ed}\, r \sin\beta - p_{nc} r\, l_{ec} - p_{nh} (\cos\beta - \mu \sin\beta)\, r\, l_{eh} \qquad (8.15)$$

де (див. рисунок 8.5):
r радіус циліндричної стінки бункера;
β половиний кут хопера (у верхній частині);

where (see figure 8.5):
r is the radius of the silo cylinder wall;
β is the half angle of the hopper (at the top);

l_{ec} ефективна довжина циліндричного сегменту над перехідним сполученням (див. (4));

l_{eh} ефективна довжина сегменту хопера (див. (4));

$n_{\upsilon h,Ed}$ розрахункове значення меридіального напруження на одиницю кола у верхній частині хопера;

p_{nc} усереднений тиск на ефективну довжину циліндричного сегменту;

p_{nh} усереднений тиск на ефективну довжину сегменту хопера

μ коефіцієнт тертя стінки хопера.

l_{ec} is the effective length of the cylinder segment above the transition (see (4));

l_{eh} is the effective length of the hopper segment (see (4));

$n_{\upsilon h,Ed}$ is the design value of the meridional tension per unit circumference at the top of thehopper;

p_{nc} is the mean local pressure on the effective length of the cylinder segment;

p_{nh} is the mean pressure on the effective length of the hopper segment;

μ is the hopper wall friction coefficient.

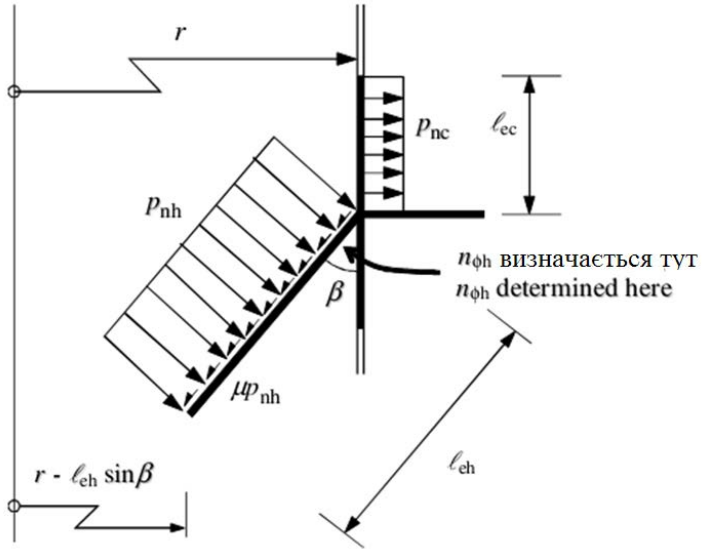


Рисунок 8.5 Локальний тиск і результуючі навантаження на перехідне кільце внаслідок мембранного напруження

Figure 8.5 Local pressures and membrane stress resultant loadings on the transition ring

(10) Максимальне розрахункове напруження при стиску $\sigma_{u\theta,Ed}$ для сполучення, що має рівномірну підтримку, повинне визначатися виходячи з виразу:

(10) The maximum design compressive stress $\sigma_{u\theta,Ed}$ for the uniformly supported junction should be determined from:

$$\sigma_{u\theta,Ed} = \frac{N_{\theta,Ed}}{\eta A_{et}}; \tag{8.16}$$

$$\eta = 1 + 0{,}3\frac{b}{r}, \tag{8.17}$$

де:

$N_{\theta,Ed}$ ефективна сила стискування в кільцевому напрямі; див. (9);

A_{et} загальна корисна площа кільця; див. (7);

r радіус циліндричної стінки бункера;

where:

$N_{\theta,Ed}$ is the effective circumferential compressive force, see (9);

A_{et} is the total effective area of the ring, see (7);

r is the radius of the silo cylinder wall;

b ширина кільчастої пластини.

b is the width of the annular plate.

8.2.3 *Кільцева балка перехідного сполучення*

(1) При розрахунку бункерів класу наслідків 3, повинен проводитися чисельний аналіз конструкції, який дозволяє моделювати усі елементи з листа, на кшталт сегментів оболонки, і не припускає дію призматичної балки на будь-який криволінійний елемент. Цей аналіз повинен враховувати кінцеву ширину відособлених опор.

(2) Стосовно бункерів інших класів наслідків мають бути розраховані згинні і крутні моменти в зоні кільцевої балки з урахуванням ексцентриситету при завантаженні і з опорою на центр тяжіння кільцевої балки.

(3) Загальний осьовий тиск стискування в кільцевому напрямі, що виник у балці, повинен прийматися, як незмінний по периметру кола. Він визначається з виразу:

8.2.3 *Transition junction ring girder*

(1) For silos in Consequence Class 3, a numerical analysis of the structure should be carried out, that models all plate elements as shell segments, and does not assume prismatic beam action in any curved element. The analysis should take account of the finite width of the discrete supports.

(2) For silos in other Consequence Classes, the bending moments and torques within the ring girder should be calculated, accounting for the eccentricities of loading and support from the ring girder centroid.

(3) The total circumferential compressive thrust developed in the girder should be assumed invariant around the circumference and determined from:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\upsilon h,Ed}\, r_c \sin\beta - p_{nc} r_c\, l_{ec} - p_{nh}\,(\cos\beta - \mu \sin\beta)\, r_c\, l_{eh} \qquad (8.18)$$

де (див. рисунок 8.5:

r_c радіус циліндричної стінки бункера;

β половиний кут хопера (у верхній частині);

l_{ec} корисна довжина циліндричного елементу вища за перехід (див. 8.2.2 (4));

l_{eh} корисна довжина сегменту хопера (див. 8.2.2 (4));

$n_{\upsilon h,Ed}$ розрахункове значення меридіального натягу на одиницю кола у вершині хопера;

p_{nc} локальний тиск на ефективній довжині сегменту циліндра;

p_{nh} тиск на ефективній довжині сегменту бункера;

μ коефіцієнт тертя стінки хопера.

where (see figure 8.5):

r_c is the radius of the silo cylinder wall;

β is the half angle of the hopper (at the top);

l_{ec} is the effective length of the cylinder segment above the transition (see 8.2.2 (4));

l_{eh} is the effective length of the hopper segment (see 8.2.2 (4));

$n_{\upsilon h,Ed}$ is the design value of the meridional tension per unit circumference at the top of thehopper;

p_{nc} is the mean local pressure on the effective length of the cylinder segment;

p_{nh} is the mean pressure on the effective length of the hopper segment;

μ is the hopper wall friction coefficient.

(4) Зміна кільцевої координати θ розрахункового згинного моменту $M_{r,Ed}$

(4) The variation with circumferential coordinate θ of the design bending moment

відносно горизонтальної (радіальної) осі (позитивний згинаючий момент) і розрахункового крутильного моменту $T_{\theta,Ed}$ в кільцевій балці повинна бути прийнята із:

$M_{r,Ed}$ about the horizontal (radial) axis (sagging positive) and the design torsional moment $T_{\theta,Ed}$ in the ring girder should be taken as:

$$M_{r,Ed} = n_{xc,Ed}\,(r_g - e_r)\,[(r_g - e_s)\,\theta_o\,(\sin\theta + \cot\theta_o \cos\theta) - r_g + e_r] + n_{\upsilon h,Ed}\,e_x\,(r_g - e_r) \quad (8.19)$$

$$T_{\theta,Ed} = n_{xc,Ed}\,(r_g - e_r)\,[(r_g - e_s)\,\theta_o\,(\cot\theta_o \sin\theta - \cos\theta) + r_g(\theta_o - \theta)] \quad (8.20)$$

при with:

$$\theta_o = \frac{\pi}{j} \quad (8.21)$$

де (див. рисунок 8.6):

θ кільцева координата (у радіанах), що виміряється у вихідній точці координат однієї опори;

θ_o периферичний кут в радіанах, напівпрогоної кільцевої балки;

j кількість рівновіддалених відособлених опор;

r_g радіус центру тяжіння кільцевої балки;

e_r радіальний ексцентриситет циліндра відносно центру тяжіння кільцевої балки (позитивний, якщо центр тяжіння має більший радіус);

e_s радіальний ексцентриситет опори відносно центру тяжіння кільцевої балки (позитивний, якщо центр тяжіння має більший радіус);

e_x вертикальний ексцентриситет центру з'єднання відносно центру тяжіння кільцевої балки (позитивний, якщо центр тяжіння знаходиться нижче центру з'єднання);

$n_{xc,Ed}$ розрахункове значення результуючої стискуючої мембранного напруження в основі циліндра;

$n_{\upsilon h,Ed}$ розрахункове значення результуючої розтягуючої мембранного напруження у вершині хопера.

where (see figure 8.6):

θ is the circumferential coordinate (in radians) measured from an origin at one support;

θ_o is the circumferential angle in radians subtended by the half span of the ring girder;

j is the number of equally spaced discrete supports;

r_g is the radius of the ring girder centroid;

e_r is the radial eccentricity of the cylinder from the ring girder centroid (positive where the centroid is at a larger radius);

e_s is the radial eccentricity of the support from the ring girder centroid (positive where the centroid is at a larger radius);

e_x is the vertical eccentricity of the joint centre from the ring girder centroid (positive where the centroid lies below the joint centre).

$n_{xc,Ed}$ is the design value of compressive membrane stress resultant at the base of the cylinder:

$n_{\upsilon h,Ed}$ is the design value of tensile membrane stress resultant at the top of the hopper.

(5) Пікові значення розрахункового згинного моменту відносно радіальної осі, які зустрічаються над опорою $M_{rs,Ed}$ і в середині прогону $M_{rm,Ed}$ повинні визначатися з:

(5) The peak values of the design bending moment about the radial axis that occur over the support $M_{rs,Ed}$ and at midspan $M_{rm,Ed}$ should be determined from:

$$M_{rs,Ed} = n_{xc,Ed}\,(r_g - e_r)\,[(r_g - e_s)\,\theta_o \cot\theta_o - r_g + e_r] + n_{\upsilon h,Ed}\,e_x\,(r_g - e_r) \quad (8.22)$$

$$M_{rm,Ed} = n_{xc,Ed}\,(r_g - e_r)\,[(r_g - e_s)\,\theta_o \sin\theta_o - r_g + e_r] + n_{\upsilon h,Ed}\,e_x\,(r_g - e_r) \quad (8.23)$$

(6) Якщо застосовується кільцева балка з відкритим перерізом, необхідно припускати, що опір крутильному

(6) Where an open section ring girder is used, the torque should be assumed to be resisted entirely by warping, unless a more

моменту виявляється повністю за рахунок деформації, якщо не проводити більш точний аналіз. Якщо деформація протидіє крутильному моменту, пікові розрахункові значення згинного моменту відносно вертикальної осі в кожній полиці мають прийматися у вигляді $M_{fs,Ed}$ в опорі і $M_{fm,Ed}$ в середині прогону і можуть бути обчислені таким чином:

precise analysis is used. Where warping resists the torques, the peak design values of flange moment about a vertical axis in each flange should be taken as given by $M_{fs,Ed}$ at the support and $M_{fm,Ed}$ at midspan, obtained as follows:

$$M_{fs,Ed} = n_{xc,Ed}\frac{r_g(r_g - e_r)}{h}\left[(r_g - e_s)(1-\theta_o\cot\theta_o) - \frac{r_g\theta_o^2}{3}\right] \quad (8.24)$$

$$M_{fm,Ed} = n_{xc,Ed}\frac{r_g(r_g - e_r)}{h}\left[(r_g - e_s)(1-\theta_o/\sin\theta_o) - \frac{r_g\theta_o^2}{6}\right] \quad (8.25)$$

де h відстань по вертикалі між полицями кільцевої балки.

where h is the vertical separation between the flanges of the ring girder.

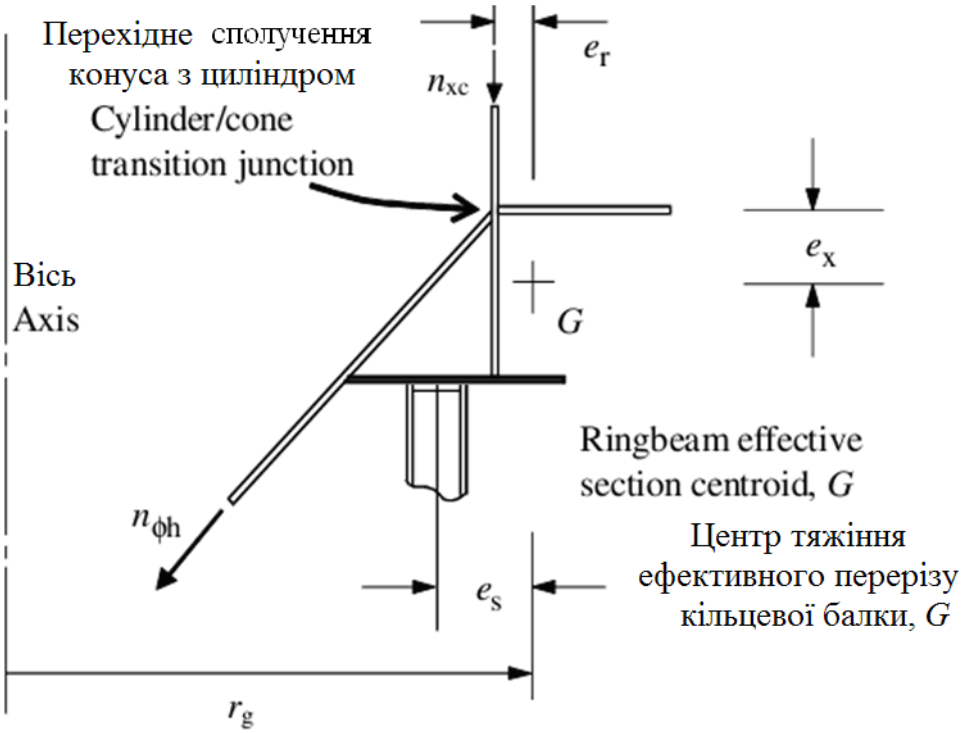


Рисунок 8.6 Ексцентриситет вертикальних навантажень на кільцеву балку

Figure 8.6 Eccentricities of vertical loads at a ring girder

(7) Периферичні мембранні напруження $\sigma_{\theta,Ed}$, які накопичуються в кожній полиці кільцевої балки, мають бути обчислені на основі параметрів осьового навантаження $N_{\theta,Ed}$, радіального осьового моменту $M_{r,Ed}$ і згинних моментів при деформації $M_{f,Ed}$ за допомогою прикладної теорії проектування вигину і деформації, а також шляхом прийняття головних векторів напруження, що визначені

(7) The circumferential membrane stresses $\sigma_{\theta,Ed}$ that develop in each flange of the ring girder should be determined from the thrust $N_{\theta,Ed}$, radial axis moment $M_{r,Ed}$ and warping flange moments $M_{f,Ed}$ using engineering bending and warping theory and adopting the stress resultants defined in (3) to (6).

в (3) – (6).

(8) Найбільше значення периферичного мембранного напруження $\sigma_{\theta,Ed}$ (працюючого як на розтяг, так і на стиск), яке накопичується в полицях кільцевої балки у будь-якому положенні по периметру кола, повинне визначатися як $\sigma_{m\theta,Ed}$.

(8) The largest value of the circumferential membrane stress $\sigma_{\theta,Ed}$ (whether tensile or compressive) that develops in either flange of the ring girder at any position around the circumference should be determined as $\sigma_{m\theta,Ed}$.

(9) Найбільший тиск стискування при периферичному мембранному напруженні $\sigma_{\theta,Ed}$, яке розвивається в полицях кільцевої балки у будь-якому положенні по периметру кола, повинен визначатися як $\sigma_{c\theta,Ed}$.

(9) The largest compressive value of the circumferential membrane stress $\sigma_{\theta,Ed}$ that develops in either flange of the ring girder at any position around the circumference should be determined as $\sigma_{c\theta,Ed}$.

8.3 Опір конструкцій

8.3 Structural resistances

8.3.1 *Загальні положення*

8.3.1 *General*

(1) Перехідне з'єднання повинне задовольняти вимогам EN 1993-1-6. Вони можуть бути виконані за допомогою оцінки наступних параметрів розрахункового опору.

(1) The transition junction should satisfy the provisions of EN 1993-1-6, but these may be met using the following assessments of the design resistance.

8.3.2 *Опір граничному стану при розвитку пластичної деформації*

8.3.2 Resistance to plastic limit state

8.3.2.1 *Загальні положення*

8.3.2.1 *General*

(1) Розрахункове значення опору повинне визначатися за допомогою положень, передбачених в EN 1993-1-6. Замість простого і досить точного наближення до цих положень можна використовувати наступні оціночні параметри опору.

(1) The design value of the resistance should be determined using the provisions of EN 1993-1-6. Thefollowing resistance assessments may be used instead as a simple safe approximation to those provisions.

8.3.2.2 *Опір на основі оцінки еластичності*

8.3.2.2 *Resistance based on elastic evaluation*

(1) Розрахункове значення опору повинне визначатися в точці найвищого напруження з'єднання.

(1) The design value of the resistance should be determined at the most highly stressed point in the junction.

(2) Розрахункове значення опору в граничному стані пластичності повинне визначатися за допомогою виразу:

(2) The design value of the resistance of the plastic limit state should be determined using:

$$f_{p,Rd} = f_y / \gamma_{M0} \qquad (8.26)$$

8.3.2.3 *Опір на основі оцінки пластичності*

(1) Розрахункове значення опору повинне визначатися з урахуванням досягнення розрахункового мембранного напруження при розтягу $n_{\upsilon h,Rd}$ в зоні з'єднання хопера.

(2) Розрахункове значення опору в граничному стані пластичності $n_{\upsilon h,Rd}$ повинне визначатися за допомогою виразу:

8.3.2.3 *Resistance based on plastic evaluation*

(1) The design value of the resistance should be determined in terms of the attainable tensile membrane stress resultant $n_{\upsilon h,Rd}$ in the hopper at the junction.

(2) The design value of the resistance at the plastic limit state $n_{\upsilon h,Rd}$ should be determined using:

$$n_{\upsilon h,Rd} = \frac{1}{\sin\beta}\left\{\left(\frac{A_p + l_{oc}t_c + l_{os}t_s + l_{oh}t_h}{r}\right)\cdot\frac{f_y}{\mu_{M0}} + p_{nc}l_{oc} + p_{nc}(\cos\beta - \mu\sin\beta)l_{eh}\right\} \qquad (8.27)$$

при with:

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}} \qquad (8.28)$$

$$\psi = 0{,}7 + 0{,}6\alpha^2 - 0{,}3\alpha^3 \qquad (8.29)$$

- для циліндра
- for the cylinder

$$l_{oc} = 0{,}975\sqrt{rt_c}$$

- для юбки
- for the skirt

$$l_{os} = 0{,}975\psi\sqrt{rt_s}$$

- для сегменту конічного хопера
- for the conical hopper segment

$$l_{oh} = 0{,}975\psi\sqrt{\frac{rt_h}{\cos\beta}}$$

де (див. рисунок 8.5) :

r радіус циліндричної стінки бункера;

t_c товщина стінки циліндра;

t_s товщина листа юбки;

t_h товщина оболонки хопера;

A_p площа поперечного перерізу кільця;

β неповний кут хопера (у верхній частині);

l_{oc} ефективна пластична довжина сегменту циліндра над перехідним з'єднанням;

l_{oh} ефективна пластична довжина сегменту хопера;

l_{os} ефективна пластична довжина сегменту юбки нижча перехідного з'єднання;

$n_{\upsilon h,Rd}$ меридіальний мембранний опір на одиницю кола у верхній частині хопера;

where (see figure 8.5):

r is the radius of the silo cylinder wall;

t_c is the thickness of the cylinder;

t_s is the thickness of the skirt;

t_h is the thickness of the hopper;

A_p is the cross-sectional area of the ring;

β is the half angle of the hopper (at the top);

l_{oc} is the plastic effective length of the cylinder segment above the transition;

l_{oh} is the plastic effective length of the hopper segment;

l_{os} is the plastic effective length of the skirt segment below the transition;

$n_{\upsilon h,Rd}$ is the meridional membrane resistance per unit circumference at the top of the hopper;

p_{nc} середній локальний тиск на ефективну довжину сегменту циліндра;
p_{nh} усереднений тиск на ефективну довжину сегменту хопера;
μ коефіцієнт тертя стінки хопера.

p_{nc} is the mean local pressure on the effective length of the cylinder segment;
p_{nh} is the mean pressure on the effective length of the hopper segment;
μ is the hopper wall friction coefficient.

8.3.3 *Опір втраті стійкості в одній площині*

8.3.3 *Resistance to in-plane buckling*

(1) Розрахункове значення опору повинне визначатися відповідно до положень EN 1993-1-6. Замість простого і досить точного наближення до цих положень можна використовувати наступні оціночні параметри опору.

(1) The design value of the resistance should be determined using the provisions of EN 1993-1-6. Thefollowing resistance assessment may be used instead as a simple safe approximation to those provisions.

(2) Розрахункове значення опору повинне визначатися в точці з'єднання, де зустрічається найвище стискуюче мембранне напруження в кільцевому напрямі.

(2) The design value of the resistance should be assessed using the point in the junction where the highest compressive circumferential membrane stress occurs.

(3) Розрахункове значення опору втраті стійкості в одній площині $\sigma_{ip,Rd}$ повинне визначатися за допомогою виразу:

(3) The design value of the resistance against in-plane buckling $\sigma_{ip,Rd}$ should be determined using:

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{4EI_z}{A_{et}r_g^2} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \tag{8.30}$$

де:
EI_z згинна жорсткість ефективного поперечного перерізу кільця відносно його вертикальної осі (див. рисунок 8.3);
A_{et} ефективна площа поперечного перерізу кільця, наведена в 8.2.2;
r_g радіус центру тяжіння ефективного поперечного перерізу кільця.

where:
EI_z is the flexural rigidity of the ring effective cross-section (see figure 8.3) about its vertical axis;
A_{et} is the effective cross-sectional area of the ring, given by 8.2.2;
r_g is the radius of the centroid of the ring effective cross-section.

(4) Приведений вище параметр оцінки опору і пов'язана з ним перевірка стійкості до втрати стійкості в одній площині (див. 8.4) можуть бути опущені, якщо половина кута конуса β більше β_{lim}.

(4) The above resistance assessment and the associated verification against in-plane bucking of 8.4 may be omitted when the cone half angle β is greater than β_{lim}.

Примітка: Значення β_{lim} може бути наведене в Національному додатку. Рекомендоване значення $\beta_{lim} = 20°$.

NOTE: The National Annex may choose the value of β_{lim}. The value $\beta_{lim} = 20°$is recommended.

8.3.4 *Опір втраті стійкості при бічному випучуванні і локальному викривленні оболонки в зоні з'єднання*

8.3.4 *Resistance to out-of-plane buckling and local shell buckling near the junction*

8.3.4.1 *Загальні положення*

8.3.4.1 *General*

(1) Розрахункове значення опору повинне визначатися відповідно до положень EN 1993-1-6. Замість простого і досить точного наближення до цих положень можна використовувати наступні оціночні параметри опору.

(1) The design value of the resistance should be determined using the provisions of EN 1993-1-6. Thefollowing resistance assessments may be used instead as a simple safe approximation to those provisions.

8.3.4.2 *Локальне викривлення оболонки в зоні з'єднання*

8.3.4.2 *Local shell buckling near the junction*

(1) Є перехідні з'єднання, де відсутнє кільцеве посилення (просте з'єднання воронки з циліндром) і перехідні з'єднання, посилені кільцем. Розрахункове значення опору викривленню оболонки $\sigma_{op,Rd}$ в стінці суміжною із з'єднанням повинне визначатися за допомогою виразу:

(1) For junctions in which there is either no ring at the transition (simple cone to cylinder junction), or the transition is ring stiffened. the design value of the resistance $\sigma_{op,Rd}$ against shell buckling of the wall adjacent to the junction should be determined using:

$$\sigma_{op,Rd} = \frac{1}{\gamma_{M1}} \cdot 4{,}1\left(\cos\beta\right)^4 \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1{,}5} \cdot \left(\frac{Etr_g}{A_{et}}\right) \tag{8.31}$$

де with:

$r_s = r$ для циліндричної стінки; for the cylindrical wall

$r_s = \frac{r}{\cos\beta}$ для стінки конічного хопера; for the conical hopper wall

де:
r радіус циліндричної стінки бункера;
β половина кута у вершині хопера;
t товщина листа у відповідному сегменті оболонки;
A_{et} ефективна площа поперечного перерізу кільця, наведена в 8.2.2;
r_g радіус центру тяжіння ефективного поперечного перерізу кільця.

where:
r is the radius of the silo cylinder wall;
β is the hopper apex half angle;
t is the thickness of the relevant shell segment;
A_{et} is the effective cross-sectional area of the ring, given by 8.2.2;
r_g is the radius of the centroid of the ring effective cross-section.

8.3.4.3 Перехідне з'єднання з кільчастою пластиною

8.3.4.3 Annular plate transition junction

(1) В з'єднаннях, в яких кільце в зоні переходу виконане у вигляді кільчастої пластини, розрахункове значення опору втраті стійкості при бічному випучуванні $\sigma_{op,Rd}$ повинне визначатися за допомогою виразу:

(1) For junctions in which the ring at the transition is in the form of an annular plate, the design value of the resistance against out-of-plane buckling $\sigma_{op,Rd}$ should be determined using:

$$\sigma_{op,Rd} = kE\left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \tag{8.32}$$

при with:

$$k = \frac{\eta_c k_c + \eta_s k_s}{\eta_c + \eta_s} \tag{8.33}$$

$$k_s = 0,385 + 0,452\sqrt{\frac{b}{r}} \tag{8.34}$$

$$k_c = 1,154 + 0,56\frac{b}{r} \tag{8.35}$$

$$\eta_s = 0,43 + 0,1\left(\frac{r}{20b}\right)^2 \tag{8.36}$$

$$\eta_c = 0,5\left\{\left(\frac{t_c}{t_p}\right)^{5/2} + \left(\frac{t_s}{t_p}\right)^{5/2} + \left(\frac{t_h}{t_p}\right)^{5/2}\right\} \tag{8.37}$$

де:

r радіус циліндричної стінки бункера;

t_c товщина листа циліндра;

t_s товщина листа юбки;

t_h товщина листа хопера;

t_p товщина кільця у вигляді кільчастої пластини;

b ширина кільця у вигляді кільцеподібної пластини;

k_c коефіцієнт повздовжнього вигину пластини в кільці із затисненою внутрішньою гранню;

k_s коефіцієнт повздовжнього вигину пластини в кільці з вільно опертою внутрішньою гранню;

γ_{M1} частковий коефіцієнт; див. 2.9.2.

where:

r is the radius of the silo cylinder wall;

t_c is the thickness of the cylinder;

t_s is the thickness of the skirt;

t_h is the thickness of the hopper.

t_p is the thickness of the annular plate ring;

b is the width of the annular plate ring;

k_c is the plate buckling coefficient for a ring with clamped inner edge;

k_s is the plate buckling coefficient for a ring with simply supported inner edge;

γ_{M1} is the partial factor, see 2.9.2.

8.3.4.4 *Перехідне з'єднання з тавровим профілем*

(1) Наступний метод розрахунку опору повинен застосовуватися, якщо кільце перехідного з'єднання складається з кільцеподібної пластини шириною b_p з симетричними вертикальними посилюючими полицями заввишки b_f розташованими на її зовнішній грані, утворюючи кільце з тавровим (Т-подібним) перерізом, основа якого знаходиться в центрі з'єднання.

8.3.4.4 *T section transition junction*

(1) The following assessment should be used where the transition junction ring consists of an annular plate of width b_p with a symmetrically placed vertical stiffening flange of height b_f at its outer edge, forming a T section ring with the base of the T at the joint centre.

(2) Розрахункове значення опору втраті стійкості при граничному значені напруження повздовжнього вигину $\sigma_{op,Rd}$ у кільцевій балці з тавровим перерізом повинне визначатися на основі максимального зусилля стиску в стані мембранного напруження в кільцевому

(2) The design value of the resistance against out-of-plane buckling $\sigma_{op,Rd}$ of a T-section ring beam should be determined on the basis of the maximum compressive value of the circumferential membrane stress on the inner edge of the principal annular plate of the ring. The design value of the resistance should

напрямі на внутрішній грані головної кільцеподібної пластини. Розрахункове значення опору повинне визначатися за допомогою виразу:

be determined from:

$$\sigma_{op,Rd} = \frac{\eta_s \sigma_s + \eta_c \sigma_c}{\eta_s + \eta_c} \cdot \frac{1}{\gamma_{M1}} \tag{8.38}$$

$$\eta_s = 0,385 + \left(\frac{r}{175 b_p} \right)^2 \tag{8.39}$$

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left(\frac{t_c}{t_p} \right)^{5/2} + \left(\frac{t_s}{t_p} \right)^{5/2} + \left(\frac{t_h}{t_p} \right)^{5/2} \right\} \tag{8.40}$$

$$\sigma_s = \frac{EI_r}{Ar_0^2} \left(0,2 \frac{b_p}{r} + \frac{GI_t}{EI_r} + 2 \sqrt{\frac{GI_t b_p}{EI_r r}} \right) \tag{8.41}$$

$$\sigma_p = E \left(\frac{t_p}{b_p} \right)^{1,1} \cdot \frac{(1+5\rho)\left(1+32\rho-16\rho^2\right)}{64 \left(1+5 \frac{b_f t_f}{b_p t_p} \right)} \tag{8.42}$$

$$r_o^2 = \frac{I_r + I_z + A x_c^2}{A} \tag{8.43}$$

$$\rho = \frac{b_f}{b_p} \left(\frac{t_f}{t_p} \right)^{1/3} \tag{8.44}$$

де:

r радіус циліндричної стінки бункера;

t_c товщина листа циліндра;

t_s товщина листа юбки;

t_h товщина листа хопера.

t_p товщина кільця у вигляді кільцеподібної пластини;

t_f товщина зовнішньої вертикальної полиці таврового перерізу;

b_p ширина кільця у вигляді кільцеподібної пластини;

b_f висота (ширина полиці) зовнішньої вертикальної полиці таврового перерізу;

A площа поперечного перерізу таврової кільцевої балки;

x_c відстань між центром тяжіння таврового перерізу і зовнішньою гранню;

I_r осьовий момент інерції таврового перерізу відносно його радіальної осі;

I_z осьовий момент інерції таврового перерізу відносно його вертикальної осі;

I_t рівномірна постійна кручення для таврового перерізу;

γ_{M1} частковий коефіцієнт, див. 2.9.2.

where:

r is the radius of the silo cylinder wall;

t_c is the thickness of the cylinder;

t_s is the thickness of the skirt;

t_h is the thickness of the hopper.

t_p is the thickness of the annular plate ring;

t_f is the thickness of the outer vertical flange of the T section;

b_p is the width of the annular plate ring;

b_f is the height (flange width) of the outer vertical flange of the T section;

A is the cross-sectional area of the T-section ring beam;

x_c is the distance between the centroid of the T-section and its inner edge;

I_r is the second moment of area of the T-section about its radial axis;

I_z is the second moment of area of the T-section about its vertical axis;

I_t is the uniform torsion constant for the T-section;

γ_{M1} is the partial factor, see 2.9.2.

8.4 Перевірка граничних станів

8.4.1 *Рівномірно підтримувані перехідні з'єднання*

(1) Якщо розрахунки бункера виконувались за допомогою комп'ютерного аналізу, повинні застосовуватися процедури, передбачені EN 1993-1-6. Якщо комп'ютерний аналіз не включає дослідження на предмет втрати стійкості, для визначення опору втраті стійкості з метою перевірки граничних станів згідно EN 1993-1-6 може застосовуватися розділ 8.3.

(2) Якщо бункер спирається на юбку, яка доходить до однорідного фундаменту (див. 5.4.2), і виконані розрахунки, передбачені в 8.2, можна вважати, що перехідне з'єднання схильне до дії тільки рівномірного мембранного напруження в кільцевому напрямі $\sigma_{u\theta,Ed}$ як визначено в 8.2.2(10). Тоді необхідно провести перевірку наступних граничних станів.

(3) Для оцінки граничного стану пластичності за допомогою оцінки пружності, граничний стан пластичності з'єднання повинен визначатися за допомогою виразу:

$$\sigma_{u\theta,Ed} \le f_{p,Rd} \tag{8.45}$$

де:
$\sigma_{u\theta,Ed}$ розрахункове значення напруження, визначене з 8.2.2 (10);
$f_{p,Rd}$ розрахункове значення пластичного опору, визначене з 8.3.2.2.

(4) Якщо для оцінки граничного стану пластичності використовується розрахунок пластичності, перевірка оцінки граничного стану пластичності з'єднання повинна виконуватися за допомогою виразу:

$$n_{\upsilon h,Ed} \le n_{\upsilon h,Rd} \tag{8.46}$$

де:

8.4 Limit state verifications

8.4.1 *Uniformly supported transition junctions*

(1) Where the silo has been analysed using a computer analysis, the procedures of EN 1993-1-6 should be used. Where the computer analysis does not include a buckling analysis, section 8.3 may be used to provide the buckling resistances for the limit state verification in EN 1993-1-6.

(2) Where the silo is supported on a skirt extending to a uniform foundation (see 5.4.2) and the calculations of 8.2 have been carried out, the transition junction may be deemed to be subject only to a uniform circumferential membrane stress $\sigma_{u\theta,Ed}$ as determined in 8.2.2 (10). The following limit state verifications should then be carried out.

(3) Where the plastic limit state is assessed using an elastic evaluation, the plastic limit state for the junction should be verified using:

where:
$\sigma_{u\theta,Ed}$ is the design value of the stress taken from 8.2.2 (10);
$f_{p,Rd}$ is the design value of the plastic resistance taken from 8.3.2.2.

(4) Where the plastic limit state is assessed using a plastic evaluation, the plastic limit state for the junction should be verified using:

where:

$n_{\upsilon h,Ed}$ розрахункове значення результуючої меридіального мембранного напруження у верхній частині хопера;
$n_{\upsilon h,Rd}$ розрахункове значення пластичного опору, визначене з 8.3.2.3.

$n_{\upsilon h,Ed}$ is the design value of the meridional membrane stress resultant at the top of the hopper;
$n_{\upsilon h,Rd}$ is the design value of the plastic resistance taken from 8.3.2.3.

(5) Граничний стан втрати стійкості в одній площині з'єднання повинен перевірятися за допомогою виразу:

(5) The in-plane buckling limit state for the junction should be verified using:

$$\sigma_{u\theta,Ed} \le \sigma_{ip,Rd} \tag{8.47}$$

де:
$\sigma_{u\theta,Ed}$ розрахункове значення напруження, визначене з 8.2.2 (10);
$\sigma_{ip,Rd}$ розрахункове значення опору втраті стійкості в одній площині, визначене з 8.3.3.

where:
$\sigma_{u\theta,Ed}$ is the design value of the stress taken from 8.2.2 (10);
$\sigma_{ip,Rd}$ is the design value of the in-plane buckling resistance taken from 8.3.3.

(6) Перевірку граничного стану при втраті стійкості в одній площині можна не проводити, якщо будуть задоволені обидві наступні умови:
− половина кута конуса β більше ніж $\beta_{\lim}$ і над кільцем розташований циліндр;
− при висоті циліндра L що менше ніж $L_{\min} = k_L\sqrt{rt}$, верхня межа циліндра утримується від відхилень від округлості кільцем, що має згинну жорсткість EI_z відносно своєї вертикальної осі (згин в кільцевому напрямі) вище ніж:

(6) The limit state verification against in-plane buckling may be omitted if both of the following conditions are met:

− the cone half angle β is greater than $\beta_{\lim}$ and there is a cylinder above the ring;
− where the cylinder has a height L less than $L_{\min} = k_L\sqrt{rt}$, the upper boundary of the cylinder is restrained against out-of-round displacements by a ring with a flexural rigidity EI_z about its vertical axis (circumferential bending) greater than:

$$EI_{z,\min} = k_R E\left(rt\right)^2\sqrt{\left(t/r\right)} \tag{8.48}$$

де:
t товщина найтоншого поясу в циліндрі.

where:
t is the thickness of the thinnest strake in the cylinder.

Примітка 1: Значення $\beta_{\lim}$, k_L і k_R можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендоване значення $\beta_{\lim} = 10°$, $k_L = 10$ і $k_R = 0{,}04$.

NOTE 1: The National Annex may choose the values of $\beta_{\lim}$, k_L and k_R. The values $\beta_{\lim} = 10°$, $k_L = 10$ and $k_R = 0{,}04$ are recommended.

Примітка 2: Вимога щодо утримання округлості на верхній межі циліндра стосується тільки невисоких циліндрів вище за перехідне кільце, оскільки вищі циліндри забезпечують достатній опір цьому типу втрати стійкості і самі зберігають свою круглу форму без додаткового підсилення.

NOTE 2: The requirement that the top of the cylinder should be restrained to remain circular is only relevant for short cylinders above the transition ring, since taller cylinders provide sufficient restraint against this mode of buckling without being themselves restrained to remain circular.

(7) Граничний стан втрати стійкості з'єднання при бічному випучуванні повинен перевірятися за допомогою виразу:

(7) The out-of-plane buckling limit state for the junction should be verified using:

$$\sigma_{u\theta,Ed} \le \sigma_{op,Rd} \tag{8.49}$$

де:
$\sigma_{u\theta,Ed}$ розрахункове значення напруження, визначене з 8.2.2(10);
$\sigma_{op,Rd}$ відповідне розрахункове значення опору втраті стійкості з'єднання при бічному випучуванні, визначене з 8.3.4.

where:
$\sigma_{u\theta,Ed}$ is the design value of the stress taken from 8.2.2(10);
$\sigma_{op,Rd}$ is the appropriate design value of the out-of-plane buckling resistance taken from 8.3.4.

8.4.2 *Кільцева балка перехідного з'єднання*

(1) Якщо розрахунки бункера виконувались за допомогою комп'ютерного аналізу, повинні застосовуватися процедури, передбачені EN 1993-1-6. Якщо комп'ютерний аналіз не включає дослідження на предмет втрати стійкості, для визначення опору втраті стійкості з метою перевірки граничних станів згідно EN 1993-1-6 може застосовуватися розділ 8.3.

(2) Якщо бункер спирається на відособлені опори так, що перехідне з'єднання виконує функції кільцевої балки по відношенню до мембранних напружень в кільцевому напрямі, які змінюються в поперечному перерізі і по периметру кола, такі зміни мають бути враховані в процесі перевірки граничних станів. Якщо розрахунки виконувались відповідно до 8.2, необхідно провести перевірку наступних граничних станів.

(3) При розрахунку граничного стану пластичності з'єднання, повинне застосовуватися оцінювальне значення напруження $\sigma_{m\theta,Ed}$ з 8.2.3 (8). Воно підлягає перевірці за допомогою виразу:

8.4.2 *Transition junction ring girder*

(1) Where the silo has been analysed using a computer analysis, the procedures of EN 1993-1-6 should be used. Where the computer analysis does not include a buckling analysis, section 8.3 may be used to provide the buckling resistances for the limit state verification in EN 1993-1-6.

(2) Where the silo is discretely supported, so that the transition junction acts as a ring girder with circumferential membrane stresses which vary across the section and around the circumference, this variation should be taken into account in the limit state verifications. Where the calculations of 8.2 have been carried out, the following limit state verifications should be undertaken.

(3) The plastic limit state for the junction should use the evaluated stress $\sigma_{m\theta,Ed}$ from 8.2.3 (8) and should be verified using:

$$\sigma_{m\theta,Ed} \le f_{p,Rd} \tag{8.50}$$

де:
$\sigma_{m\theta,Ed}$ розрахункове значення напруження, визначене з 8.2.3 (8);
$f_{p,Rd}$ розрахункове значення пластичного опору, визначене з 8.3.2.2.

where:
$\sigma_{m\theta,Ed}$ is the design value of the stress taken from 8.2.3 (8);
$f_{p,Rd}$ is the design value of the plastic resistance taken from 8.3.2.2.

(4) При розрахунку граничного стану втрати стійкості з'єднання в одній площині повинно застосовуватися оцінювальне значення напруження $\sigma_{c\theta,Ed}$ з 8.2.3(9). Воно підлягає перевірці за

(4) The in-plane buckling limit state for the junction should use the evaluated stress $\sigma_{c\theta,Ed}$ from 8.2.3 (9) and should be verified using:

допомогою виразу:

$$\sigma_{c\theta,Ed} \le \sigma_{ip,Rd} \quad (8.51)$$

де:

$\sigma_{c\theta,Ed}$ розрахункове значення напруження, визначене з 8.2.3(9);

$\sigma_{ip,Ed}$ розрахункове значення опору втраті стійкості в одній площині, визначене з 8.3.3.

where:

$\sigma_{c\theta,Ed}$ is the design value of the stress taken from 8.2.3 (9);

$\sigma_{ip,Ed}$ is the design value of the in-plane buckling resistance taken from 8.3.3.

(5) Перевірку граничного стану при втраті стійкості в одній площині можна не проводити, якщо будуть задоволені обоє з наступних двох умов:

– половина кута конуса β більше ніж $\beta_{\lim,}$ і над кільцем розташований циліндр;

– при висоті циліндра L меншій ніж $L_{\min} = k_L\sqrt{rt}$, верхня межа циліндра утримується від відхилень від округлості кільцем, що має згинну жорсткість EI_z відносно своєї вертикальної вісі (згин в кільцевому напрямі) вище ніж:

(5) The limit state verification against in-plane buckling may be omitted if both of the following conditions are met:

− the cone half angle β is greater than $\beta_{\lim,}$ and there is a cylinder above the ring;

− where the cylinder has a height L less than $L_{\min} = k_L\sqrt{rt}$, the upper boundary of the cylinder is restrained against out-of-round displacements by a ring with a flexural rigidity EI_z about its vertical axis (circumferential bending) greater than:

$$EI_{z,\min} = k_R E(rt)^2\sqrt{(t/r)} \quad (8.52)$$

де:

t товщина найтоншого поясу в циліндрі;

L висота стінки оболонки над кільцем.

where:

t is the thickness of the thinnest strake in the cylinder;

L is the height of the shell wall above the ring.

Примітка 1 : Значення $\beta_{\lim,}$ k_L і k_R можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендоване значення $\beta_{\lim,} = 10^o$ $k_L = 10$ і $k_R = 0,04$.

NOTE 1: The National Annex may choose the values of $\beta_{\lim,}$, k_L and k_R The values $\beta_{\lim,} = 10^o$, $k_L = 10$ and $k_R = 0,04$ are recommended.

Примітка 2: Вимога про утримання округлості на верхній межі циліндра стосується тільки невисоких циліндрів вище за перехідне кільце, оскільки вищі циліндри забезпечують достатній опір цьому типу втрати стійкості і самі зберігають свою круглу форму без додаткового посилення.

NOTE 2: The requirement that the top of the cylinder should be restrained to remain circular is only relevant for short cylinders above the ring, since taller cylinders provide sufficient restraint against this mode of buckling without being themselves restrained to remain circular.

(6) При граничному стані втрати стійкості з'єднання – бічному випучуванні, повинно застосовуватися оцінювальне значення напруження $\sigma_{C\theta,Ed}$ з 8.2.3(9). Воно підлягає перевірці за допомогою виразу:

(6) The out-of-plane buckling limit state for the junction should use the evaluated stress $\sigma_{C\theta,Ed}$ from 8.2.3 (9) and should be verified using:

$$\sigma_{C\theta,Ed} \le \sigma_{op,Rd} \quad (8.51)$$

де:

$\sigma_{C\theta,Ed}$ розрахункове значення напружен-

where:

$\sigma_{C\theta,Ed}$ is the design value of the stress taken

ня, визначене з 8.2.3(9);
$\sigma_{op,Rd}$ розрахункове значення опору втраті стійкості при бічному випучувані, визначене з 8.3.4.

from 8.2.3 (9);
$\sigma_{op,Rd}$ is the design value of the out-of-plane buckling resistance taken from 8.3.4.

8.5 Розгляд схем розташу-вання опорних елементів сполучення

8.5 Considerations concerning support arrangements for the junction

8.5.1 *З'єднання, підтримувані юбкою*

(1) Якщо бункер спирається на юбку, яка доходить до однорідного фундаменту (див. 5.4.2), можна вважати, що перехідне з'єднання несе навантаження, яке викликане тільки мембраними напруженнями в кільцевому напрямі.

(2) Юбка підлягає перевірці на предмет опору втраті стійкості при осьовому стиску з урахуванням впливу отворів в юбці.

8.5.1 *Skirt supported junctions*

(1) Where the silo is supported on a skirt extending to a uniform foundation (see 5.4.2), the transition junction may be deemed to carry only circumferential membrane stresses.

(2) The skirt should be checked for resistance to buckling under axial compression, including the effects of openings in the skirt.

8.5.2 *З'єднання і кільцеві балки, що підтримуються опорними стійками*

(1) Якщо бункер спирається на відособлені опори або стійки, а кільцева балка перехідного з'єднання застосовується для розподілу навантажень з опор на оболонку, перехідне з'єднання і кільцева балка повинні задовольняти умовам, вказаним в 8.2.3 та 8.4.2.

(2) Якщо кільцева балка перехідного з'єднання формується шляхом скріплення болтами верхньої і нижньої половин, кожна з яких кріпиться до різних сегментів оболонки, розмір болтів має бути підібраний так, щоб вони витримали передачу всього розрахункового навантаження, що діє в кільцевому напрямі та сприймає верхній кільцевий сегмент. При цьому необхідно належним чином врахувати дію згинниих сил на кільце.

8.5.2 *Column supported junctions and ring girders*

(1) Where the silo is supported on discrete supports or columns, and a transition ring girder is used to distribute column forces into the shell, the junction and ring girder should satisfy the conditions given in 8.2.3 and 8.4.2.

(2) Where a transition ring girder is formed by bolting together an upper and lower half, each attached to a different shell segment, the bolts should be proportioned to resist transmission of the full design value of the circumferential force to be carried in the upper ring segment, taking proper account of bending actions in the ring.

8.5.3 *Опорне кільце в основі бункера*

(1) Бункер, який має постійні опори на рівні землі, має бути оснащений опорним

8.5.3 *Base ring*

(1) A silo that is continuously supported on the ground should be provided with a base

кільцем в основі і деталями для анкерного пристрою.

ring and anchorage details.

(2) Інтервал по периметру кола між анкерними болтами або іншими точками кріплення анкерів не повинен перевищувати $4\sqrt{rt}$, де t- це локальна товщина листа оболонки.

(2) The circumferential spacing of anchorage bolts or other attachment points should not exceed $4\sqrt{rt}$, where t is the local thickness of the shell plate.

(3) Опорне кільце в основі бункера повинне мати згинну жорсткість EI_z відносно вертикальної вісі (щоб протистояти повздовжньому вигину в кільцевому напрямі) більшу за мінімальне значення $EI_{z,\min}$, яка представлена наступним виразом :

(3) The base ring should have a flexural rigidity EI_z about a vertical axis (to resist circumferential bending) greater than the minimum value $EI_{z,\min}$ given by:

$$EI_{z,\min} = k \cdot Ert^3 \tag{8.54}$$

де t береться за товщину стінки поясу, суміжного з опорним кільцем основи.

where t should be taken as the thickness of the wall strake adjacent to the base ring.

Примітка: Значення k може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $k = 0{,}10$.

NOTE: The National Annex may choose the value of k. The value $k = 0{,}10$ is recommended.

9 ПРОЕКТУВАННЯ ПРЯМОКУТНИХ БУНКЕРІВ З ПЛОСКИМИ БІЧНИМИ СТІНКАМИ

9.1 Основа

(1) Прямокутний бункер повинен проектуватися або як короб з посиленням, який витримує переважно згинне напруження, або як тонка мембранна конструкція, яка витримує переважно мембранні напруження, що виникають в результаті сильних деформацій.

(2) Якщо короб розрахований на дії вигину, з'єднання повинні проектуватися так, щоб міцність з'єднання, що передбачалася під час проведення аналізу напружень, була досягнута в процесі експлуатації.

9.2 Класифікація конструкційних форм

9.2.1 *Бункери без посилення*

(1) Конструкція, виготовлена з плоских сталевих листів, без прикріплених до них ребер жорсткості, повинна називатися коробом без посилення.

(2) Конструкція, посилена тільки уздовж з'єднань між листами, які лежать в різних площинах, також повинна називатися коробом без посилення.

9.2.2 *Бункери з посиленням*

(1) Конструкція, виготовлена з плоских листів, до яких прикріплені ребра жорсткості в межах площі листа, повинна називатися посиленим коробом. Ребра жорсткості можуть бути периферичними, вертикальними або ортогональними (орієнтованими в двох напрямах під прямим кутом).

9 DESIGN OF RECTANGULAR AND PLANAR-SIDED SILOS

9.1 Basis

(1) A rectangular silo should be designed either as a stiffened box in which the structural action is predominantly bending, or as a thin membrane structure in which the action is predominantly membrane stresses developing after large deformations.

(2) Where the box is designed for bending action, the joints should be designed to ensure that the connectivity assumed in the stress analysis is achieved in the execution.

9.2 Classification of structural forms

9.2.1 *Unstiffened silos*

(1) A structure formed from flat steel plates without attached stiffeners should be termed an 'unstiffened box'.

(2) A structure stiffened only along joints between plates which are not coplanar should also be termed an 'unstiffened box'.

9.2.2 *Stiffened silos*

(1) A structure formed from flat plates to which stiffeners are attached within the plate area should be termed a 'stiffened box'. The stiffeners may be circumferential or vertical or orthogonal (two directional).

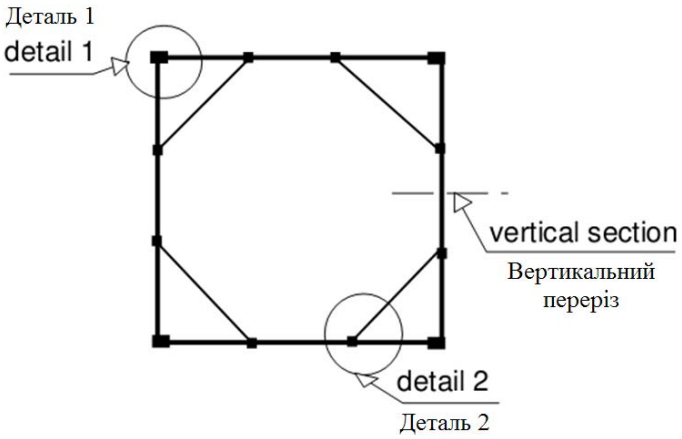


Рисунок 9.1 Горизонтальна проекція прямокутного короба зі затяжками
Figure 9.1 Plan view of tied rectangular box silo

9.2.3 *Бункери із затяжками*

(1) Бункери із затяжками можуть бути квадратними або прямокутними

Примітка: Деякі типові конструктивні елементи для 3-х-панельного квадратного (однокамерного) бункера наведені на рисунках 9.1, 9.2 і 9.3.

9.2.3 *Silos with ties*

(1) Silos with ties may be square or rectangular.

NOTE: Some typical structural components for a 3-panel square (single cell) silo are shown in figures 9.1, 9.2 and 9.3.

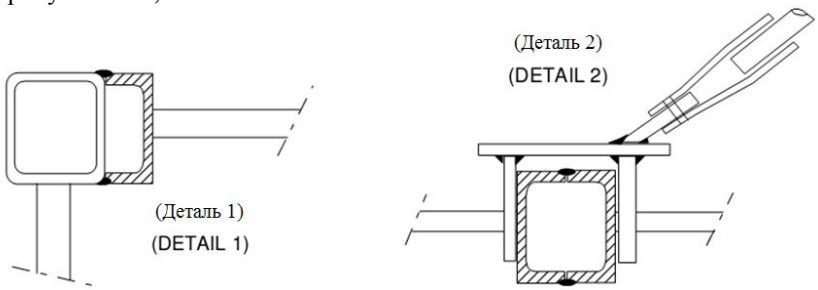


Рисунок 9.2 Типові деталі з'єднань на затяжках
Figure 9.2 Typical details of tie connections

9.3 Опір вертикальних стінок без посилення

(1) Опір вертикальних стінок повинен оцінюватися у відповідності до EN 1993-1-7. В якості альтернативи можна вважати, що вимогам цього стандарту задовольняють положення, що наведені в 9.4.

(2) Розрахунок опору вертикальних стінок повинен виконуватися з урахуванням мембранної дії і вигину листів.

9.3 Resistance of unstiffened vertical walls

(1) The resistance of vertical walls should be evaluated in accordance with EN 1993-1-7. Alternatively, the provisions set out in 9.4 may be deemed to satisfy the provisions of that Standard.

(2) The resistance of vertical walls should be evaluated considering both the membrane and plate bending actions.

(3) Дії на лист, що не має посилення, можна розділити на наступні категорії:
− згин листа в двох вимірах під впливом матеріалу, що зберігається;
− поява напружень в результаті дії мембрани;
− локальний згин під впливом зберігаючого матеріалу і/або устаткування.

(3) The actions on the unstiffened plate may be divided into the following categories:
− bending as a 2D plate from the stored material;
− stresses resulting from diaphragm action;

− local bending action from the stored material and/or equipment.

9.4 Опір стінок бункера з гофрованих листів з посилен-ням

9.4 Resistance of silo walls composed of stiffened and corrugated plates

9.4.1 *Загальні положення*

9.4.1 *General*

(1) Опір елементів вертикальних стінок, що не мають посилення, повинен визначатися відповідно до положень, викладених в 9.4. Розрахунок опору повинен виконуватися з урахуванням мембранної дії і вигину листів.

(1) The resistance of unstiffened parts of vertical walls should be evaluated in accordance with the provisions set out in 9.4. The resistance evaluation should consider both membrane and plate bending actions.

(2) Проект передбачає застосування листів з горизонтальним гофром з метою:
− опору загальній дії вигину внаслідок тиску зберігаючого матеріалу;
− опору напруженням, що з'явилися в результаті дії мембрани;
− опору локальному вигину зберігаючого матеріалу і/або устаткування.

(2) Horizontally corrugated plates should be designed for:
− general bending action from pressures due to the stored material;
− stresses resulting from their diaphragm action;
− local bending action from the stored material and/or equipment.

(3) Ефективні властивості вигину і опір вигину листів, що мають посилення, виводяться відповідно до положень EN 1993-1-3 про трапецеїдальне представлення обшивки з проміжними ребрами жорсткості.

(3) Effective bending properties and bending resistance of the stiffened plates should be derived in accordance with the provisions for trapezoidal sheeting with intermediate stiffeners in EN 1993-1-3.

(4) Проект ребер жорсткості виконується відповідно до порядку проектування елементів конструкцій, викладеним в EN 1993-1-1 і EN 1993-1-3, з урахуванням сумісності ребер жорсткості з елементами стінки, ефекту ексцентриситету оболонки відносно вісей ребер жорсткості, згинній цілісності стінних елементів і перерізів горизонтальних і вертикальних ребер жорсткості. Напруження, що виникають в ребрах жорсткості, які орієнтовані перпендикулярно повздовжній вісі і перетинають конструктивно нерозривні елементи стінки, повинні прийматися в

(4) The design of the stiffeners should be made in accordance with member design given in EN1993-1-1 and EN1993-1-3, taking into account the compatibility of the stiffeners with the wall elements, the effect of the eccentricity of the sheeting in relation to the stiffener-axes, and the flexural continuities of wall elements and intersection horizontal and vertical stiffeners. Stresses normal to the longitudinal axis arising in stiffeners, which intersect structurally continuous wall-elements, should be taken into account additionally in the member design.

розрахунок додатково при проектуванні окремих елементів.

(5) Передача навантаження від вертикальних ребер жорсткості до граничних елементів основи конструкції має бути розрахована відносно кожного конкретного елементу і з урахуванням опору самого фундаменту.

(5) The load transfer of vertical stiffeners to base boundary elements should be designed in accordance with the specific element and the given foundation resistance.

(6) Значення жорсткості на зсув і опір виводяться за результатами випробувань або відповідних теоретичних викладень.

(6) Shear stiffness and resistance should be derived by testing or appropriate theoretical expressions.

(7) Якщо немає точнішої методики, опір на зсув при повздовжньому вигині можна визначити відповідно до 5.3.4.6, розглядаючи радіус оболонки як нескінченну величину.

(7) Unless a more precise method is available, the shear buckling strength may be assessed using 5.3.4.6 and treating the radius of the shell as infinite.

(8) Якщо проводити випробування, відповідне значення жорсткості на зсув можна прийняти за січне значення, досягнуте при 2/3 тимчасовому опору зрізу; див. рисунок 9.4.

(8) Where testing is used, the relevant shear stiffness may be taken as the secant value achieved at 2/3 of the ultimate shear strength, see figure 9.4.

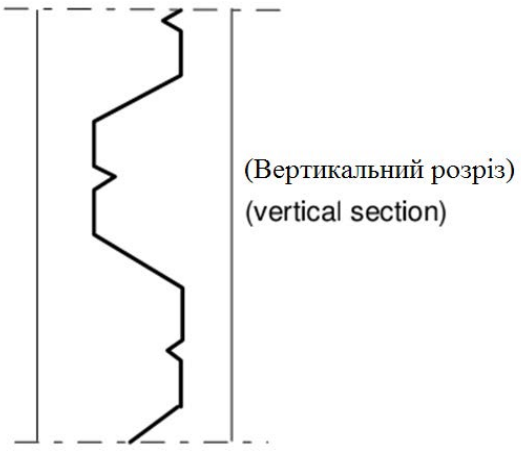


Рисунок 9.3 Типовий переріз гофрованої стінки прямокутного бункера у вертикальній площині

Figure 9.3 Typical section on a vertical plane through the corrugated wall of rectangular silo

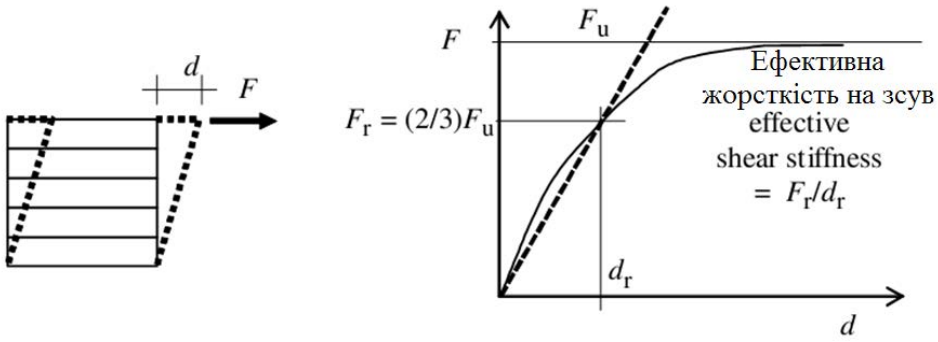


Рисунок 9.4 Реакція гофрованої стінки на зсув
Figure 9.4 Shear response of corrugated wall

9.4.2 *Опір загальному вигину в результаті прямої дії зберігаючого матеріалу*

(1) Згин по горизонталі необхідно розглядати як результат дії тиску в горизонтальній площині або дії тиску в горизонтальній площині у сполученні з тертям стінки бункера.

(2) Розрахунок вигину під дією тільки тиску по горизонталі, повинен грунтуватися на ефективних властивостях, представлених в EN 1993-1-3.

(3) Розрахунок вигину, що виникає під впливом тиску по горизонталі у сполученні з тертям стінки бункера, може грунтуватися на концепції, представленій на рисунку 9.5, де переріз стінки між точкою A і точкою B розглядається як поперечний переріз вигину під дією комбінованого тиску p_g. Напруження, що виникає в цей момент, повинне поєднуватися з тим, яке виникає під впливом осьової сили, що створюється під тиском зберігаючого матеріалу на сусідні перпендикулярні стінки (див. 9.4.3).

Примітка: Це спосіб розрахунку, що встановлений і загальновизнаний. Проте необхідно зазначити, що при цьому ігнорується постійне напруження між суміжними стінними панелями.

9.4.2 *General bending from direct action of the stored material*

(1) Bending should be considered where horizontal bending can arise resulting from horizontal pressure or from horizontal pressure combined with wall friction.

(2) For bending from horizontal pressure alone, the calculation should be based on the effective properties as given by EN 1993-1-3.

(3) For bending arising from horizontal pressure combined with wall friction, the calculation may be based on the concept outlined in figure 9.5, where the wall section between Point A and Point B is considered as a cross-section in bending under the action of the combined pressure p_g. The stresses arising from the moment should be combined with those from the axial force arising from the stored material pressure on the adjacent perpendicular walls (see 9.4.3).

NOTE: This calculation is conventional and well established. However, it may be noted that the continuity of strain between adjacent wall sections is neglected.

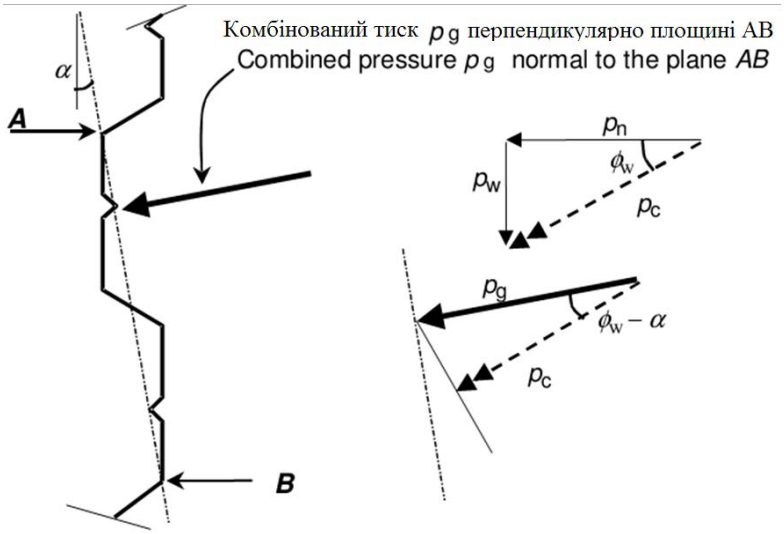


Рисунок 9.5 Згин в результаті поєднання тиску по горизонталі з тертям об стінки бункера (вертикальний розріз)
Figure 9.5 Bending resulting from combined horizontal pressure and friction (vertical section)

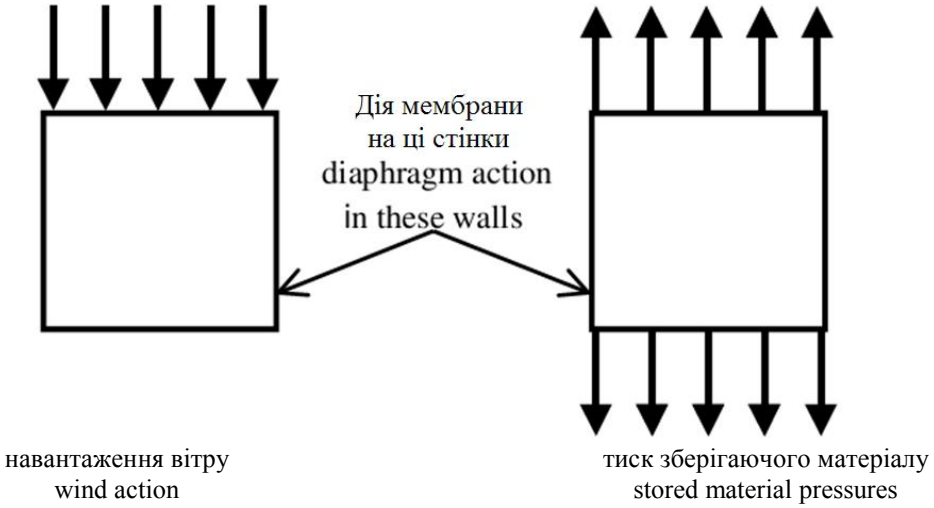


Рисунок 9.6 Мембранні сили, що виникають в стінках під тиском твердих матеріалів або вітрового навантаження
Figure 9.6 Bending resulting from combined horizontal pressure and friction (vertical section)

9.4.3 *Напруження в оболонці під впливом мембрани*

(1) Напруження з'являється в результаті тиску зберігаючого матеріалу і/або тиску вітру перпендикулярно сусіднім стінкам; див. рисунок 9.6.

(2) Згідно із спрощеним правилом тиск матеріалу що зберігається може бути прийнятий за нормальний тиск (при цьому тертя стінки ігнорується).

9.4.3 *Membrane stresses from diaphragm action*

(1) The stresses result from pressure of stored material and/or wind on the perpendicular neighbouring walls, see figure 9.6.

(2) As a simple rule, pressures from the stored material may be taken as only normal pressures (neglecting wall friction).

(3) Пряме і дотичне напруження під впливом вітру можна визначити також ручним розрахунком або розрахунком методом скінчених елементів.

(3) Direct and shear stresses from wind action may be determined using either hand calculations or a finite element calculation.

9.4.4 *Локальна згинна дія зберігаючо-го матеріалу і/або устаткування*

(1) Необхідно враховувати вірогідність негативної дії локального вигину на будь-якому конструктивному елементі в результаті тиску зберігаючого матеріалу.

Примітка: У випадку, представленому на рисунку 9.7, перевірка конструктивного елементу CD показала, що він може знаходитися в критичному стані.

9.4.4 *Local bending action from the stored material and/or equipment*

(1) The possibility of deleterious local bending effects in any structural element due to the local stored material pressure should be taken into account.

NOTE: In the situation shown in figure 9.7, the structural check on the plate element CD may be critical.

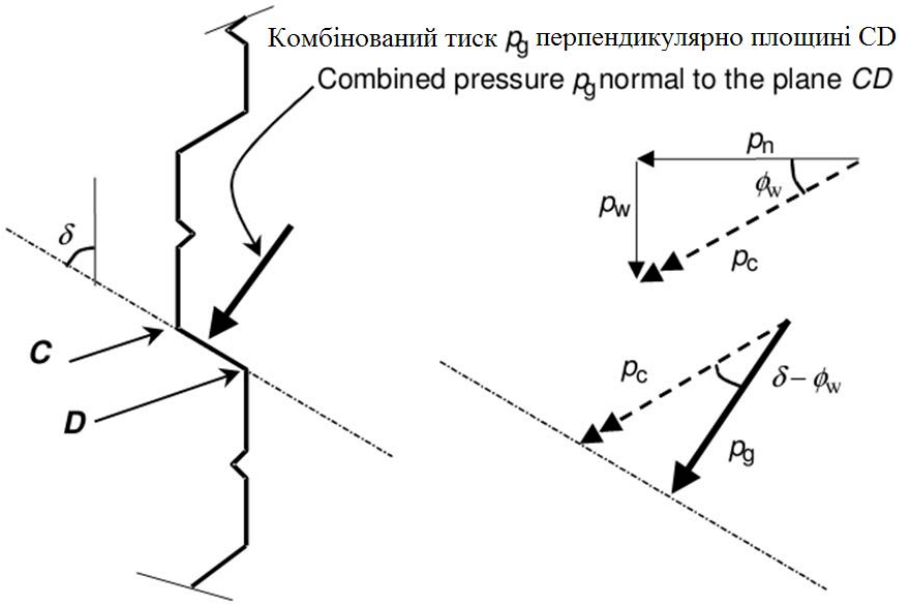


Рисунок 9.7 Можливі локальні дії вигину
Figure 9.7 Possible local bending actions

9.5 Бункери з внутрішніми затяжками

9.5 Silos with internal ties

9.5.1 *Сили, які виникають у внутріш-ніх затяжках від тиску твердих матеріалів*

(1) Необхідно враховувати силу, з якою матеріал що зберігається впливає на затяжку.

(2) Якщо не виконувати більш точні розрахунки, сила, з якою сипучий матеріал що зберігається q_t впливає на одиницю довжини затяжки, може бути

9.5.1 *Forces in internal ties due to solids pressure on them*

(1) The force exerted by the stored bulk solid on the tie should be evaluated.

(2) Unless more precise calculations are made, the force exerted by the solid q_t per unit length of tiemay be approximated by:

приблизно виражена як:

$$q_t = C_t \cdot p_v \cdot b \tag{9.1}$$

при with:

$$C_t = \frac{C_{s\beta}}{k_L} \tag{9.2}$$

де:

p_v вертикальний тиск зберігаючого матеріалу на рівні затяжки;

b максимальна ширина затяжки по горизонталі;

C_t кратність збільшення навантаження;

C_s аеродинамічний коефіцієнт поперечного перерізу затяжки;

k_L коефіцієнт стану завантаження;

β коефіцієнт місця розташування затяжки, який залежить від положення затяжки в камері бункера (див. рисунки 9.8 і 9.9).

(3) Аеродинамічний коефіцієнт C_s приймається наступним чином:

− для круглих рівних перерізів: $C_s = C_{sc}$;

− для круглих нерівних або поперечних перерізів: $C_s = C_{ss}$.

Примітка: Значення C_{sc} і C_{ss} можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендоване значення $C_{sc} = 1,0$ і $C_{ss} = 1,2$.

(4) Коефіцієнт стану завантаження k_L приймається наступним чином:

− при завантаженні сипучих твердих матеріалів: $k_L = k_{Lf}$

− при розвантаженні сипучих твердих матеріалів: $k_L = k_{Le}$.

Примітка: Значення k_{Lf} і k_{Le} можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендоване значення $k_{Lf} = 4,0$ і $k_{Le} = 2,0$.

where:

p_v is the vertical pressure within the stored material at the tie level;

b is the maximum horizontal width of the tie;

C_t is the load magnification factor;

C_s is the shape factor for the tie cross-section;

k_L is the loading state factor;

β is the tie location factor, that depends on the position of the tie within the silo cell (see figures 9.8 and 9.9).

(3) The shape factor C_s should be taken as follows:

− for circular smooth sections : $C_s = C_{sc}$

− for round rough or square sections :

$C_s = C_{sc}$

NOTE: The National Annex may choose the values of C_{sc} and C_{ss} The values $C_{sc} = 1,0$ and $C_{ss} = 1,2$ are recommended.

(4) The loading state factor k_L should be taken as follows:

− for bulk solids filling : $k_L = k_{Lf}$

− for bulk solids discharge : $k_L = k_{Le}$

NOTE: The National Annex may choose the value of k_{Lf} and k_{Le}. The value $k_{Lf} = 4,0$ and $k_{Le} = 2,0$ are recommended.

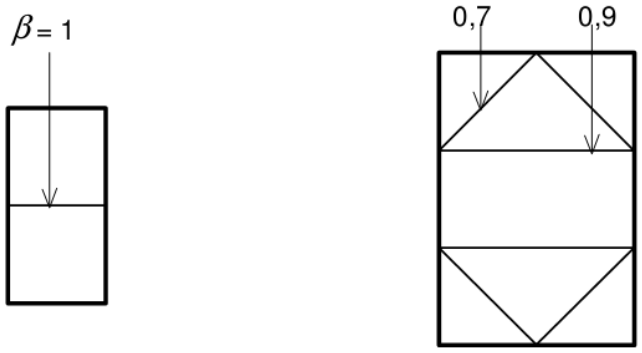


Рисунок 9.8 Розрахунок коефіцієнта β для внутрішніх затяжок
Figure 9.8 Evaluation of factor β for internal ties

9.5.2 *Моделювання затяжок*

(1) Затяжки класифікуються залежно від основного способу утримання навантаження. Затяжка відноситься до кабельного типу, якщо вона має згинну жорсткість якою можна знехтувати. Затяжка відносится до стрижневого типу, якщо вона має осьову жорсткість і значну згинну жорсткість. Розрахунок затяжки повинен відповідати конструктивному перерізу затяжки.

(2) Якщо затяжка відноситься до стрижневого типу, необхідно враховувати моменти вигину поряд з осьовим розтягом.

(3) Щоб визначити силу N (а в стрижневих затяжок – моменти M) в затяжці необхідно застосувати геометрично нелінійну систему обчислень. Ця методика розрахунку повинна враховувати реальні граничні стани і жорсткість стінки бункера (рисунок 9.10).

(4) Розрахункові значення осьового розтягу N і моменту M приймаються як значення в точках з'єднання затяжки із стінкою бункера.

(5) Початковий прогин затяжки має бути погоджений з проектною організацією і/або виробником. Кабельні затяжки (які мають згинну жорсткість якою можна знехтувати) повинні мати

9.5.2 *Modelling of ties*

(1) Ties should be classified according to the principle means by which they support the loads. A tieshould be classed as a cable if it has negligible bending stiffness. It should be classed as a rod if it has both axial stiffness and significant bending stiffness. The analysis of the tie should be appropriate to the structural response of the tie section.

(2) Where the tie is a rod, account should be taken of bending moments in addition to the axial tension.

(3) A geometrically non-linear calculation procedure should be used to determine the force N (and forrods, the moments M) in the tie. This analysis should take account of the real boundary conditions and the stiffness of the silo wall (Figure 9.10).

(4) The design values of axial tension N and moment M should be taken as the values in the tie at theconnection to the wall.

(5) The initial sag of the tie should be agreed between the designer and/or the fabricator. For cables (negligible flexural stiffness), the initial sag should not be greater than $k_s \cdot L$ where L is the length of the tie.

вихідний прогин не більше $k_s \cdot L$, де L – це довжина стягнення.

Примітка 1: Значення k_s може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $k_s = 0,01$.

NOTE 1: The National Annex may choose the value of k_s. The value $k_s = 0,01$ is recommended.

Примітка 2: Раніше в розрахунках попередньо застосовувалося значення прогину, що дорівнює $0,02 \cdot L$. Менше значення, рекомендоване тут, потрібне для того, щоб встановити залежність між тиском та індукованими силами, яка близька до лінійної в інтервалі робочого діапазону.

NOTE 2: In past practice, the sag has often been set at $0,02 \cdot L$. The smaller value that is recommended here is needed to obtain a relationship between pressures and induced forces that is close linear in the operating range.

(6) При розрахунку деталей оснащення для затяжки необхідно враховувати як вертикальні, так і горизонтальні складові розтягу затяжки в точці її кріплення.

(6) The attachment details for ties should take account of both the vertical and the horizontal components of the tie tension at the point of attachment.

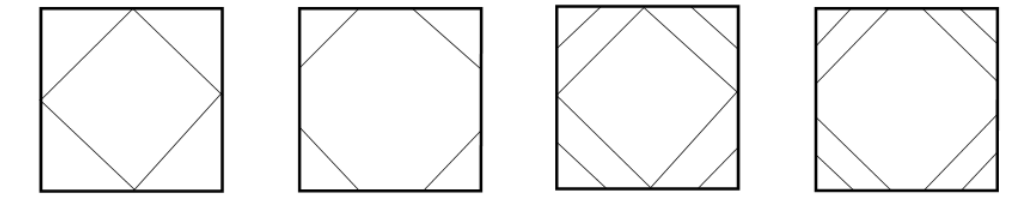


Рисунок 9.9 Кутові затяжки, для яких $\beta = 0,7$
Figure 9.9 Corner ties for which $\beta = 0,7$

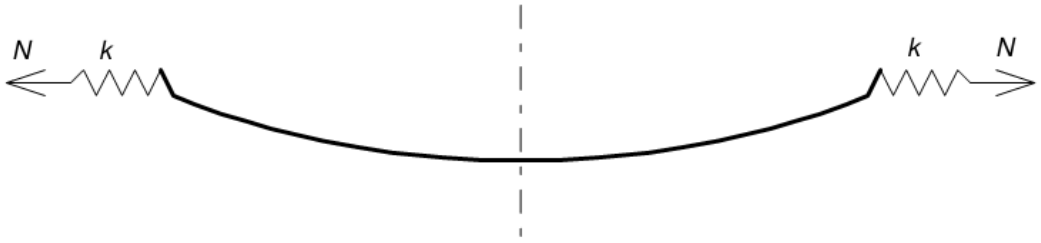


Рисунок 9.10 Розгортання сили в затяжці
Figure 9.10 Force development in a tie

9.5.3 *Приклади розрахунку навантажень на затяжку*

(1) При розрахунку навантажень на затяжку повинні враховуватися:

− дія матеріалу, що зберігається;

− сили, що передаються затяжкою в результаті деформації стінок під впливом інших навантажень.

9.5.3 *Load cases for tie attachments*

(1) The analysis of the tie should take account of:

− actions from the stored material;

− forces transmitted to the ties due to deformations of the walls from other load cases.

(2) Два приклади навантаження для перевірки розрахунку сил кріплення і моментів в затяжці:
а) приклад навантаження 1: значення q_t і N розраховуються згідно 9.5.1 і 9.5.2.
б) приклад навантаження 2: збільшене значення поперечного навантаження $1,2q_t$, і зменшене значення розтягу затяжки $0,7 \cdot N$, де q_t і N розраховані згідно 9.5.1 і 9.5.2.

(2) Two load cases for the attachment forces and moments from a tie should be checked as follows:
a) load case 1: the values of q_t and N evaluated in 9.5.1 and 9.5.2.

b) load case 2: an increased value of transverse load $1,2q_t$ and a reduced value of tie tension $0,7 \cdot N$, where q_t and N have been evaluated according to 9.5.1 and 9.5.2.

9.6 Міцність пірамідальних бункерів

(1) Пірамідальні бункери (рисунок 9.12) повинні розглядатися як коробчаті конструкції відповідно до вимог EN 1993-1-7. Можна вважати, що цим вимогам задовольняють положення 9.3 і 9.4 відносно стінок бункера, а також наступні методи наближених обчислень.

(2) Моменти вигину і мембранні сили можна визначити за допомогою чисельних методів відповідно до EN 1993-1-6 і EN 1993-1-7. В якості альтернативи згинні моменти в трапецієвидних листах хопера можна розрахувати за допомогою наступних наближених співвідношень.
(3) На листі хопера *ABCD* накреслимо рівносторонній трикутник *ABE*, що має площу *A*, а радіус рівновеликого по площі кола визначимо за допомогою виразу:

9.6 Strength of pyramidal hoppers

(1) Pyramidal hoppers (Figure 9.12) should be treated as box structures, using the provisions of EN 1993-1-7. These may be deemed to be met by the provisions of 9.3 and 9.4 for walls, together with the following approximate methods.

(2) The bending moments and membrane forces may be determined using numerical methods, in accordance with EN 1993-1-6 and EN 1993-1-7. The bending moments in the trapezoidal plates of the hopper may alternatively be evaluated using the following approximate relationships.

(3) An equilateral triangle *ABE* of area *A* should be drawn on the hopper plate *ABCD*, and the radius of the equivalent equal-area circle should be determined using:

$$r_{eq} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 0,37a \qquad (9.3)$$

де:
a довжина верхнього краю листа по горизонталі; див. рисунок 9.11.

where:
a is the horizontal length of the upper edge of the plate, see figure 9.11.

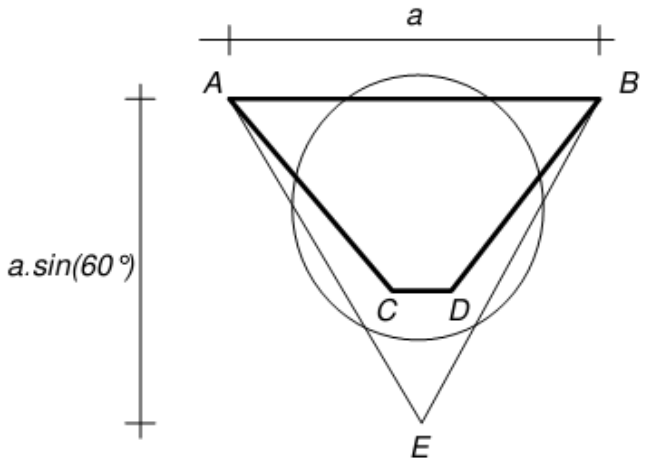


Рисунок 9.11 Проста модель вигину трапецієвидних листів
Figure 9.11 Simple model for bending of trapezoidal plates

(4) опорний згинаючий момент M_0 визначається за допомогою виразу:

(4) he reference bending moment M_0 should be determined using:

$$M_0 = \frac{3}{16} p_n r_{eq}^2 = 0,026 p_n a^2 \tag{9.4}$$

де:

where:

p_n середній тиск, що дії перпендикулярно трапецієвидному листу.

p_n is the mean normal pressure on the trapezoidal plate.

(5) Якщо краї трапецієвидного листа можна розглядати як вільно зперті, розрахункове значення згинного моменту можна прийняти за:

(5) Where the trapezoidal plate has edges that may be treated as simply supported, the design value of bending moment may be taken as:

$$M_{s,Ed} = M_0 \tag{9.5}$$

(6) Якщо краї трапецієвидного листа можна розглядати як закріплені, згинаючий момент в середині листа $M_{s,Ed}$ і згинаючий момент на кромці $M_{e,Ed}$ можна прийняти за:

(6) Where the trapezoidal plate has edges that may be treated as clamped, the bending moment at the plate centre $M_{s,Ed}$ and the bending moment at the edge $M_{e,Ed}$ may be taken as:

$$M_{s,Ed} = 0,80 \cdot M_0 \tag{9.6}$$

$$M_{e,Ed} = 0,53 \cdot M_0 \tag{9.7}$$

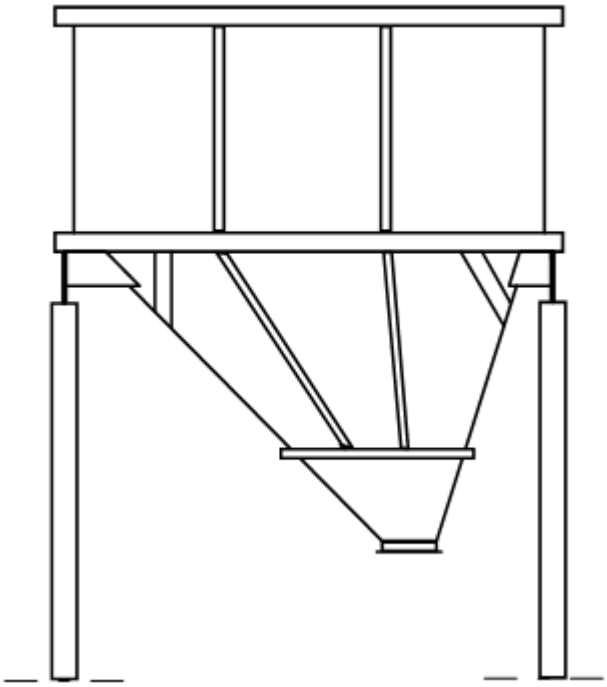


Рисунок 9.12 Асиметричний хопер з похилими ребрами жорсткості
Figure 9.12 Unsymmetrical hopper with inclined ribs

9.7 Вертикальні ребра жорст-кості на коробчатих стінках

(1) Проект вертикальних ребер жорсткості на стінках короба повинен враховувати:
− постійні дії;
− тиск сипучих твердих матеріалів перпендикулярний стінці;
− дію сили тертя на стінку;
− змінну дію даху бункера;
− осьові сили, що виникають в результаті мембранної дії на стінки.

(2) Ексцентриситетом сил тертя відносно листа і геометричної осі ребер жорсткості можна нехтувати.

9.7 Vertical stiffeners on box walls

(1) Vertical stiffeners on the walls of a box should be designed for:

− the permanent actions;
− the normal pressures on the wall due to bulk solids;
− the friction forces on the wall;
− the variable actions from the roof;
− the axial forces arising from contributions from the diaphragm action in the walls.

(2) The eccentricity of the friction forces from the plate and stiffener centrelines may be neglected.

9.8 Експлуатаційна придатність граничних станів

9.8.1 *Основа*

(1) Експлуатаційні характеристики граничних станів стінок прямокутного бункера повинні розраховуватися як:
− деформації або відхилення, які негативно впливають на ефективність застосування конструкції;

9.8 Serviceability limit states

9.8.1 *Basis*

(1) The serviceability limit states for rectangular silo walls should be taken as follows:
− deformations or deflections that adversely affect the effective use of the structure;

− деформації, відхилення, вібрація і коливання, які ушкоджують як несучі, так і не несучі елементи конструкції.

(2) Деформації, відхилення і вібрації мають бути обмежені значеннями, що відповідають вказаним вище критеріям.

(3) Конкретні граничні значення, застосування, що відповідають певній області, повинні бути погоджені між проектною організацією, замовником і відповідним наглядовим органом з урахуванням сфери застосування і природи твердих матеріалів, що зберігаються.

− deformations, deflections, vibration or oscillation that causes damage to both structural and non-structural elements.

(2) Деформации, отклонения и вибрации нужно ограничить, чтоби соответствовать више критериям.

(3) Specific limiting values, appropriate to the intended use, should be agreed between the designer, the client and the relevant authority, taking account of the intended use and the nature of the solids to be stored.

9.8.2 ***Відхилення***

(1) Граничного значення загального бічного прогину має бути прийняте найменше з:

$$\delta_{\max} = k_1 \cdot H \tag{9.8}$$

$$\delta_{\max} = k_2 \cdot t \tag{9.9}$$

де:

H висота конструкції, яка виміряється від фундаменту до даху;

t товщина найтоншого листа стінки.

Примітка: Значення k_1 і k_2 можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендоване значення $k_1 = 0,02$ і $k_2 = 10$.

(2) Максимальне відхилення $\delta_{\max}$ в межах перерізу панелі відносно її країв повинне бути обмежене значенням:

$$\delta_{\max} < k_3 \cdot L \tag{9.10}$$

де L розмір коротшої сторони прямокутного листа.

Примітка: Значення k_3 може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $k_3 = 0,05$.

9.8.2 ***Deflections***

(1) The limiting value for global lateral deflection should be taken as the lesser of:

where:

H is the height of the structure measured from the foundation to the roof;

t is the thickness of the thinnest plate in the wall.

NOTE: The National Annex may choose the values of k_1 and k_2. The values k_1 = 0,02 and $k_2 = 10$ arerecommended.

(2) The maximum deflection $\delta_{\max}$ within any panel section relative to its edges should be limited to:

where L is the shorter dimension of the rectangular plate.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_3. The value $k_3 = 0,05$ is recommended.

ДОДАТОК А (ДОВІДКОВИЙ) СПРОЩЕНІ ПРАВИЛА ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ БУНКЕРІВ КЛАСУ НАСЛІДКІВ 1

Стосовно круглих бункерів класу наслідків 1 з циліндричними стінками, такий спрощений підхід дозволяє проектувати бункери на основі крайнього граничного стану з обмеженою кількістю навантажень.

А.1 КОМБІНОВАНІ ДІЇ НА БУНКЕРИ КЛАСУ НАСЛІДКІВ 1

Бункери класу наслідків 1 можна розглядати з урахуванням нижче-наведених спрощених типів комбінованої дії :

− наповнення;

− розвантаження;

− дія вітру на порожній бункер;

− наповнення у поєднанні з вітровим навантаженням.

Допускається спрощений підхід до вітрового навантаження.

А.2 ОЦІНКА ЕФЕКТУ ДІЇ

(1) При проектуванні відповідно до положень, приведених в даному додатку, мембранні напруження слід збільшити на коефіцієнт k_M, який враховує вплив локального вигину.

Примітка: Значення k_M може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_M = 1{,}1$.

(2) При проектуванні відповідно до положень, приведених в даному додатку, сили, що впливають на хопер і кільце, слід збільшити на коефіцієнт k_h, який враховує вплив асиметричного і кільцевого вигину.

Примітка: Значення k_h може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $k_h = 1{,}2$.

ANNEX A: [INFORMATIVE] SIMPLIFIED RULES FOR CIRCULAR SILOS IN CONSEQUENCE CLASS 1

For circular silos with cylindrical walls in Consequence Class 1, this simplified treatment permits a design based only on the ultimate limit state and with a restricted number of load cases being addressed.

A.1 ACTION COMBINATIONS FOR CONSEQUENCE CLASS 1

The following simplified action combinations may be considered for silos in Consequence Class 1:

− Filling

− Discharge

− Wind when empty

− Filling, combined with wind

A simplified treatment of wind loading is permitted.

A.2 ACTION EFFECT ASSESSMENT

(1) When designing to the expressions given in this annex, the membrane stresses should be increased by the factor k_M to account for local bending effects.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_M. The value $k_M = 1{,}1$ is recommended.

(2) When designing to the expressions given in this annex, the hopper and ring forces should be increased by the factor k_h to account for unsymmetrical and ring bending effects.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_h The value $k_h = 1{,}2$ is recommended.

А.3 ОЦІНКА КРАЙНЬОГО ГРАНИЧНОГО СТАНУ

А.3.1 Загальні положення

(1) Обмежені положення цього додатка дозволяють оцінити проект, але часто виявляються стриманішими, ніж кінцеві положення цього стандарту.

А.3.2 Ізотропні циліндричні стінки на зварних або болтових з'єднаннях

А.3.2.1 Граничний стан пластичності

(1) Під впливом внутрішнього тиску і усіх відповідних розрахункових навантажень розрахунковий опір повинен визначатися в кожній точці з урахуванням коливань внутрішнього тиску і, відповідно, супротивної їм контактної міцності.

(2) В усіх точках конструкції результуючі розрахункового мембранного напруження $n_{x,Ed}$ і $n_{\theta,Ed}$ (обидва значення прийнято за позитивний розтяг) повинні задовольняти наступній умові:

$$\sqrt{n_{x,Ed}^2 - n_{x,Ed} n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2} \le t f_y / \gamma_{M0} \qquad \text{(A.1)}$$

де:

$n_{x,Ed}$ результуюча вертикального мембранного напруження (сили на одиницю ширини стінки оболонки), виведена в результаті аналізу розрахункових значень (навантажень);

$n_{\theta,Ed}$ результуюча мембранного напруження в кільцевому напрямі (сила на одиницю ширини стінки оболонки, виведена за результатами аналізу з розрахункових значень дії (навантажень);

f_y межа текучості листа оболонкової стінки;

γ_{M0} частковий коефіцієнт граничного стану пластичності.

(3) В кожному болтовому з'єднанні конструкції результуючі розрахункового напруження повинні задовольняти

A.3 ULTIMATE LIMIT STATE ASSESSMENT

A.3.1 General

(1) The limited provisions given here permit a faster assessment of a design, but they are often more conservative than the more complete provisions of the standard.

A.3.2 Isotropic welded or bolted cylindrical walls

A.3.2.1 Plastic limit state

(1) Under internal pressure and all relevant design loads, the design resistance should be determined at every point using the variation in internal pressure, as appropriate, and the local strength to resist it.

(2) At every point in the structure the design membrane stress resultants $n_{x,Ed}$ and $n_{\theta,Ed}$ (both taken as tension positive) should satisfy the condition:

$$\sqrt{n_{x,Ed}^2 - n_{x,Ed} n_{\theta,Ed} + n_{\theta,Ed}^2} \le t f_y / \gamma_{M0} \qquad \text{(A.1)}$$

where:

$n_{x,Ed}$ is the vertical membrane stress resultant (force per unit width of shell wall) derived by analysis from the design values of the actions (loads);

$n_{\theta,Ed}$ is the circumferential membrane stress resultant (force per unit width of shell wall) derived by analysis from the design values of the actions (loads);

f_y is the yield strength of the shell wall plate;

γ_{M0} is the partial factor against the plastic limit state.

(3) At every bolted joint in the structure the design stress resultants should satisfy the conditions against net section failure:

умовам, які оберігають руйнування площі перерізу нетто:

- для меридіального опору
- for meridional resistance
- для кільцевого опору
- for circumferential resistance

$$n_{x,Ed} \le f_u \cdot t / \gamma_{M2} \quad (A.2)$$

$$n_{\theta,Ed} \le f_u \cdot t / \gamma_{M2} \quad (A.3)$$

де:

f_u гранична міцність листа оболонкової стінки;

γ_{M2} частковий коефіцієнт опору розриву (=1,25).

where:

f_u is the ultimate strength of the shell wall plate;

γ_{M2} is the partial factor against rupture (=1,25).

(4) Розрахунок з'єднань повинен виконуватися відповідно до стандарту EN 1993-1-8 або EN 1993-1-3. Вплив отворів під кріплення повинен враховуватися згідно стандарту EN 1993-1-1 на основі вимог до розтягу, стиску або зсуву, відповідно.

(4) The design of connections should be carried out in accordance with EN 1993-1-8 or EN 1993-1-3. The effect of fastener holes should be taken into account according to EN 1993-1-1 using the appropriate requirements for tension or compression or shear as appropriate.

(5) Розрахунковий опір з'єднань внахлест в зварних конструкціях $f_{e,Rd}$ представлене критерієм уявної міцності :

(5) The design resistance at lap joints in welded construction $f_{e,Rd}$ is given by the fictitious strength criterion:

$$f_{e,Rd} = j \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (A.4)$$

де j це коефіцієнт міцності з'єднання.

where j is the joint efficiency factor.

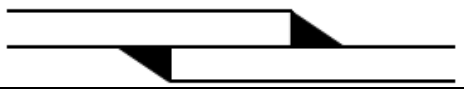
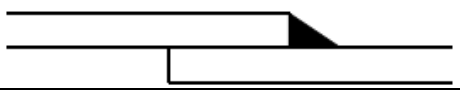
(6) Міцність деталей з'єднання зварних швів внахлест з безперервним кутовим швом має бути прийнята за $j = j_i$.

(6) The joint efficiency of lap joint welded details with full continuous fillet welds should be taken as $j = j_i$.

Примітка: Значення j_i може бути задане в Національному додатку. Рекомендуються значення j_i, приведені нижче для різних конфігурацій з'єднання.

NOTE: The National Annex may choose the value of j_i. The recommended values of j_i are given below for different joint configurations.

Міцність з'єднання j_i за допомогою зварних швів внахлест
Joint efficiency j_i of welded lap joints

Тип з'єднання Joint type	Ескіз Sketch	Значення j_i Value of j_i
Двосторонній зварний шов внахлест Double welded lap		$j_1 = 1,0$
Односторонній зварний шов внахлест Single welded lap		$j_2 = 0,35$

A.3.2.2 Осьовий стиск

A.3.2.2 Axial compression

(1) Розрахунковий опір при осьовому стиску повинен визначатися в усіх точках

(1) Under axial compression, the design resistance should be determined at every point

оболонки. При розрахунках зміна сили осьового стиску у вертикальному напрямі ігнорується, за виключенням тих випадків, коли це передбачено положеннями стандарту EN 1993-1-6. В розрахунках на повздовжній згин мембранні сили стиску повинні розглядатися як позитивні, щоб уникнути широкого використання негативних чисел.

in the shell. The design should ignore the vertical variation of the axial compression, except where the provisions of EN 1993-1-6 make provision for this. In buckling calculations, compressive membrane forces should be treated as positive to avoid widespread use of negative numbers.

(2) Коли застосовується горизонтальне з'єднання внахлест, яке викликає ексцентриситет осьової сили при проходженні через шов, приведене нижче значення α має бути зменшене до 70% попереднього значення, якщо ексцентриситет серединної поверхні листів відносно один одного перевищує величину $t/2$, а зміна товщини листа не перевищує $t/4$, де t – це товщина тоншого листа в з'єднанні. Якщо ексцентриситет складає менше вказаного значення чи зміна товщини листа більша, значення α не повинне зменшуватися.

(2) Where a horizontal lap joint is used, causing eccentricity of the axial force in passing through the joint, the value of α given below should be reduced to 70% of its previous value if the eccentricity of the middle surface of the plates to one another exceeds $t/2$ and the change in plate thickness at the joint is not more than $t/4$, where t is the thickness of the thinner plate at the joint. Where the eccentricity is smaller than this value, or the change in plate thickness is greater, no reduction need be made in the value of α.

(3) Коефіцієнт зменшення пружної деформації α визначається як:

(3) The elastic imperfection reduction factor α should be found as:

$$\alpha = \frac{0,62}{1+0,035\left(\frac{r}{t}\right)^{0,72}} \qquad (A.5)$$

де:

r радіус стінки бункера;

t товщина листа стінки в розрахунковому місці розташування.

where:

r is the radius of the silo wall;

t is the thickness of the wall plate at the location being calculated.

(4) Критичне напруження при втраті стійкості $\sigma_{x,Rcr}$ у будь-якій точці ізотропної стінки повинне обчислюватися на підставі виразу:

(4) The critical buckling stress $\sigma_{x,Rcr}$ at any point in the isotropic wall should be calculated as:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0,605E\frac{t}{r} \qquad (A.6)$$

(5) Характеристичне напруження при втраті стійкості повинне обчислюватися на основі виразу:

(5) The characteristic buckling stress should be found as:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x \cdot f_y \qquad (A.7)$$

в якому:

in which:

$\chi_x = 1$ коли when $\bar{\lambda}_x \le \bar{\lambda}_0$ (A.8)

$$\chi_x = 1 - 0,6\left(\frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0}\right) \quad \text{коли} \quad \text{when} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \tag{A.9}$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \quad \text{коли} \quad \text{when} \quad \bar{\lambda}_p \le \bar{\lambda}_x \tag{A.10}$$

при with: $\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,Rc}}}$, $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ і and $\bar{\lambda}_p = \sqrt{2,5\alpha}$

У будь-якій точці конструкції результуюча розрахункового мембранного напруження $n_{x,Ed}$ (позитивний стиск) повинна задовольняти наступній умові:

(6) At every point in the structure the design membrane stress resultant $n_{x,Ed}$ (compression positive) should satisfy the condition:

$$n_{x,Ed} \le t \cdot \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \tag{A.11}$$

де γ_{M1} – це величина, представлена в 2.9.2.

where γ_{M1} is given by 2.9.2.

Примітка: Значення γ_{M1} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\gamma_{M1} = 1,1$.

NOTE: The National Annex may choose the value of γ_{M1}. The value $\gamma_{M1} = 1,1$ is recommended.

(7) Максимально допустима деформація, що вимірюється в порядку, передбаченому стандартом EN 1993-1-6, за винятком розмірів упоперек з'єднань внахлест, визначається як:

(7) The maximum permitted measurable imperfection, using the procedures of EN 1993-1-6 and excluding measurements across lap joints, should be found as:

$$\Delta w_{od} = 0.0375\sqrt{rt} \tag{A.12}$$

(8) Розрахунок опору оболонки повздовжньому вигину при осьовому стиску вищому за локальну опору, в зоні кронштейна (тобто опори конвеєрного порталу) і поблизу отвору повинен виконуватися відповідно до 5.6.

(8) The design of the shell against buckling under axial compression above a local support, near a bracket (e.g. to support a conveyor gantry), and near an opening should be undertaken as stipulated in 5.6.

A.3.2.3 Зовнішній тиск, внутрішня часткова розрідженість і вітер

A.3.2.3 External pressure, internal partial vacuum and wind

(1) Для розрахунку рівномірної внутрішньої розрідженості (зовнішнього тиску) за наявності конструктивно пов'язаного даху, критичний зовнішній тиск повздовжнього вигину $p_{n,Rcru}$ ізотропної стінки повинен визначатися як:

(1) For uniform partial internal vacuum (external pressure), where there is a structurally connected roof, the critical buckling external pressure $p_{n,Rcru}$ for the isotropic wall should be found as:

$$p_{n,Rcru} = 0,92E\left(\frac{r}{l}\right)\left(\frac{t}{r}\right)^{2,5} \tag{A.13}$$

де:

r радіус стінки бункера;

t товщина найтоншої частини стінки;

where:

r is the radius of the silo wall;

t is the thickness of the thinnest part of the wall;

l висота між кільцями жорсткості або межами.

(2) Розрахункове значення максимального зовнішнього тиску $p_{n,Ed}$ діючого на конструкцію під комбінованою дією вітру і часткової розрідженості, повинне задовольняти наступній умові:

l is the height between stiffening rings or boundaries.

(2) The design value of the maximum external pressure $p_{n,Ed}$ acting on the structure under the combined actions of wind and partial vacuum should satisfy the condition:

$$p_{n,Ed} \le \alpha_n \cdot p_{n,Rcru} / \gamma_{M1} \qquad \text{(A.14)}$$

Примітка: Значення α_n і γ_{M1} можуть бути задані в Національному додатку. Рекомендоване значення $\alpha_n = 0,5$ і $\gamma_{M1} = 1,1$.

NOTE: The National Annex may choose the values of α_n and γ_{M1}. The values $\alpha_n = 0,5$ and $\gamma_{M1} = 1,1$ are recommended.

(3) Якщо верхній зріз циліндра не прив'язаний до даху, цей спрощений порядок підлягає заміні процедурою, приведеною в 5.3.

(3) If the upper edge of the cylinder is not connected to the roof, this simple procedure should be replaced with that of 5.3.

A.3.3 Зварні конічні хопери

(1) Спрощений порядок розрахунку може застосовуватися за умови, що будуть виконані дві наступні умови:
(а) до хопера, в якому $\gamma_{M0} = \gamma_{M0q}$, застосовується вдосконалений частковий коефіцієнт;
(б) поряд з перехідним з'єднанням на стінці хопера не повинні кріпитися ребра жорсткості або опори.

A.3.3 Conical welded hoppers

(1) A simple design procedure may be used provided that both the following conditions are met:
a) An enhanced partial factor is used for the hopper of $\gamma_{M0} = \gamma_{M0q}$;

b) No local meridional stiffeners or supports are attached to the hopper wall near the transition junction.

Примітка: Значення γ_{M0q} може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $\gamma_{M0q} = 1,4$.

NOTE: The National Annex may choose the value of γ_{M0q}. The value $\gamma_{M0q} = 1,4$ is recommended.

(2) Якщо єдиними, такими, що враховуються, навантаженнями є сила тяжіння і самопливне переміщення твердого матеріалу який зберігається, меридіальне зусилля на одиницю кола $n_{\varphi h,Ed,s}$ викликане симетричним тиском, визначеним в стандарті EN 1991-4, яке підлягає передачі через перехідне з'єднання, повинне оцінюватися за допомогою загальної рівноваги; див. рисунок А.1. При цьому розрахункове значення локального меридіального зусилля на одиницю кола $n_{\varphi h,Ed}$ що допускає можливу нерівномірність

(2) Where the only loading under consideration is gravity and flow loading from the stored solid, themeridional force per unit circumference $n_{\varphi h,Ed,s}$ caused by the symmetrical pressures defined in EN 1991-4 that must be transmitted through the transition joint should be evaluated using global equilibrium, see Figure A.1. The design value of the local meridional force per unit circumference $n_{\varphi h,Ed}$, allowing for the possible non-uniformity of the loading, should then be obtained as

навантаження, повинне обчислюватися на основі виразу :

$$n_{\varphi h,Ed} = q_{asym} \cdot n_{\varphi h,Ed,s} \quad \text{(A.15)}$$

де:

$n_{\upsilon h,Ed,s}$ розрахункове значення меридіальної мембранної сили на одиницю кола у верхній частині хопера, отримане на підставі припущення, що навантаження на хопер абсолютно симетричні;

g_{asym} коефіцієнт росту асиметричного навантаження.

Примітка: Вирази для $n_{\varphi h,Ed,s}$ можна знайти в Додатку В. Значення g_{asym} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $g_{asym} = 1{,}2$.

where:

$n_{\upsilon h,Ed,s}$ is the design value of the meridional membrane force per unit circumference at thetop of the hopper obtained assuming the hopper loads are entirely symmetrical;

g_{asym} is the unsymmetrical stress augmentation factor.

NOTE: Expressions for $n_{\varphi h,Ed,s}$ may be found in Annex B. The National Annex may choose the value of g_{asym}. The value $g_{asym} = 1{,}2$ is recommended.

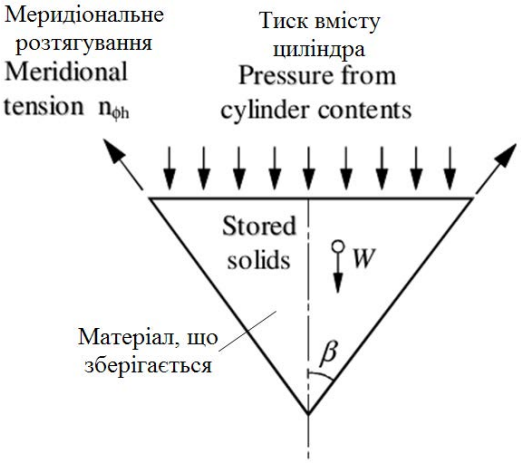


Рисунок A.1 Загальна рівновага хопера
Figure A.1 Hopper global equilibrium

(3) Розрахункове значення меридіального мембранного розтягу у вершині хопера $n_{\varphi h,Ed}$ повинне задовольняти наступній умові:

(3) The design value of the meridional membrane tension at the hopper top $n_{\varphi h,Ed}$ should satisfy thecondition:

$$n_{\varphi h,Ed} \le k_r \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad \text{(A.16)}$$

де:

t товщина листа хопера;

f_u межа міцності на розтяг;

γ_{M2} частковий коефіцієнт розриву.

where:

t is the thickness of the hopper;

f_u is the tensile strength;

γ_{M2} is the partial factor for rupture.

Примітка: Значення k_r може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $k_r = 0{,}90$. Значення γ_{M2} також може бути задане в Національному додатку. Рекомендоване значення $\gamma_{M2} = 1{,}25$.

NOTE: The National Annex may choose the value of k_r. The value $k_r = 0{,}90$ is recommended. TheNational Annex may also choose the value of γ_{M2}. The value $\gamma_{M2} = 1{,}25$ is recommended.

A.3.4 Перехідне з'єднання

(1) Цей спрощений метод

A.3.4 Transition junction

(1) This simplified design method may be

проектування може застосовуватися для бункерів класу наслідків 1, коли з'єднання складається з циліндричної і конічної секцій з або без кільчастої пластини або аналогічного компактного кільця в місці з'єднання; див. рисунок А.2.

used on silos of Consequence Class 1 where the junction consists of a cylindrical and conical section, with or without an annular plate or similarly compact ring at the junction, see figure A.2.

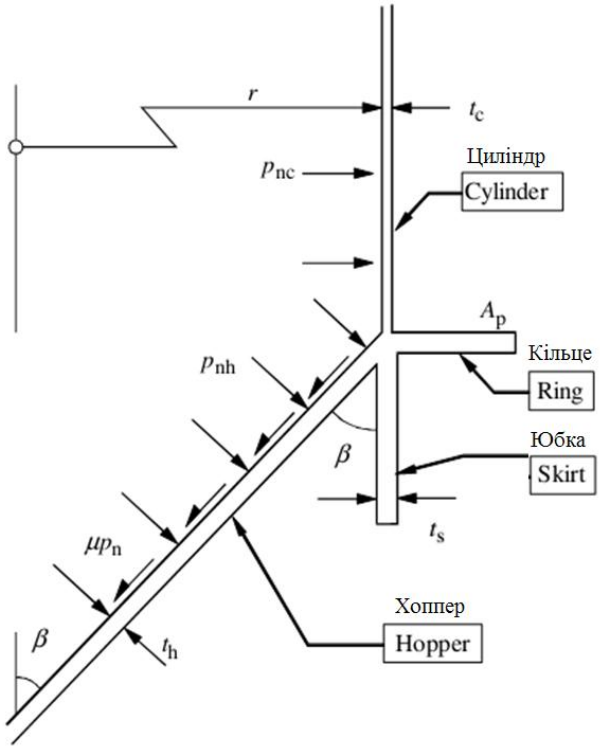


Рисунок А.2 Зображення простого перехідного з'єднання
Figure A.2 Notation for simple transition junction

(2) Загальна корисна площа кільця A_{et} визначається з виразу:

(2) The total effective area of the ring A_{et} should be found from:

$$A_{et} = A_p + 0,4\sqrt{r}\left\{t_c^{3/2} + t_s^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos\beta}}\right\} \qquad \text{(A.17)}$$

де:

r радіус циліндричної стінки бункера;

t_c товщина стінки циліндра;

t_s товщина стінки юбки;

t_h товщина стінки хопера;

β неповний кут у вершині конуса хопера;

A_p площа кільця в зоні з'єднання.

where:

r is the radius of the silo cylinder wall;

t_c is the thickness of the cylinder;

t_s is the thickness of the skirt;

t_h is the thickness of the hopper;

β is the cone apex half angle of the hopper;

A_p is the area of the ring at the junction.

(3) Розрахункове значення сили стиску в кільцевому напрямі $N_{\theta,Ed}$ що виникло в з'єднанні, повинне визначатися згідно з виразом:

(3) The design value of the circumferential compressive force $N_{\theta,Ed}$ developed in the junction should be determined from:

$$N_{\theta,Ed} = n_{\varphi h,Ed} \cdot r \cdot \sin\beta \qquad \text{(A.18)}$$

де:

$n_{\varphi h,Ed}$ розрахункове значення меридіального розтягу на одиницю кола у верхній частині хопера; див. рисунок А.1 і вираз А.15.

where:

$n_{\varphi h,Ed}$ is the design value of the meridional tension per unit circumference at the top of thehopper, see Figure A.1 and expression A.15.

(4) Середнє напруження в кільцевому напрямі в кільці повинне задовольняти наступній умові:

(4) The mean circumferential stress in the ring should satisfy the condition:

$$\frac{N_{\theta,Ed}}{A_{et}} \le \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \text{(A.19)}$$

де:

f_y найнижча межа текучості матеріалів кільця і оболонки;

γ_{M0} частковий коефіцієнт пластичності.

Примітка: Значення γ_{M0} може бути задане в Національному додатку. Рекомендується значення $\gamma_{M0} = 1,0$.

where:

f_y is the lowest yield strength of the ring and shell materials;

γ_{M0} is the partial factor for plasticity.

NOTE: The National Annex may choose the value of γ_{M0}. The value $\gamma_{M0} = 1,0$ is recommended.

ДОДАТОК В (ДОВІДКОВИЙ) ВИРАЗ МЕМБРАННИХ НАПРУЖЕНЬ В КОНІЧНИХ БУНКЕРАХ

Представлені тут вирази дозволяють виконати розрахунки відповідно до мембранної теорії напруження в тих випадках, коли їх неможливо зробити в контексті стандартних оболонок чи конструкцій бункера. Вирази мембранної теорії точно визначають мембранні напруження в корпусі хопера (тобто у точках, не зв'язаних з перехідним з'єднанням або опорою) при умові, що прикладені навантаження відповідають моделям, визначеним у EN 1991-4.

Система координат з початковою точкою z у вершині.

Висота хопера по вертикалі h і неповний кут вершини конуса β.

В.1 РІВНОМІРНИЙ ТИСК p_0 І ТЕРТЯ ОБ СТІНКУ μp_0

$$\sigma_\theta = \frac{p_o z}{t}\left(\frac{\tan\beta}{\cos\beta}\right) \quad \text{(B.1)}$$

$$\sigma_\phi = \frac{p_o z}{2t}\left(\frac{\tan\beta+\mu}{\cos\beta}\right) \quad \text{(B.2)}$$

В.2 ЛІНІЙНИЙ ЗМІННИЙ ТИСК ВІД p_1 У ВЕРШИНІ ДО p_2 В ПЕРЕХОДІ З ТЕРТЯМ ОБ СТІНКУ μp

$$p = p_1 + \frac{z}{h}(p_2 - p_1) \quad \text{(B.3)}$$

$$\sigma_\theta = \left\{p_1 + \frac{z}{h}(p_2 - p_1)\right\}\frac{z}{t}\left(\frac{\tan\beta}{\cos\beta}\right) \quad \text{(B.4)}$$

$$\sigma_\phi = \left\{3p_1 + \frac{2z}{h}(p_2 - p_1)\right\}\frac{z}{6t}\left(\frac{\tan\beta+\mu}{\cos\beta}\right) \quad \text{(B.5)}$$

Для μ = 0 максимальне значення еквівалентного напруження фон Мизеса зустрічається в корпусі конуса, якщо $p_2 < 0{,}48\,p_1$ на висоті:

$$z = 0{,}52\left(\frac{p_1}{p_2 - p_1}\right)h \quad \text{(B.6)}$$

ANNEX B: [INFORMATIVE] EXPRESSIONS FOR MEMBRANE STRESSES IN CONICAL HOPPERS

The expressions given here permit membrane theory stress analyses to be undertaken for cases which are not obtainable in standard texts on shells or silo structures. Membrane theory expressions accurately predict the membrane stresses in the body of the hopper (i.e. at points not adjacent to the transition or support) provided that the applied loadings are according to patterns defined in EN 1991-4.

Coordinate system with origin for z at the apex

Vertical height of hopper h and cone apex half angle β

B.1 UNIFORM PRESSURE p_0 WITH WALL FRICTION μp_0

(B.1) and (B.2) as above.

B.2 LINEARLY VARYING PRESSURE FROM p_1 AT APEX TO p_2 AT TRANSITION WITH WALL FRICTION μp

(B.3), (B.4), (B.5) as above.

For μ= 0, the maximum von Mises equivalent stress occurs in the body of the cone if $p_2 < 0{,}48\,p_1$ at the height:

(B.6) as above.

В.3 "РАДІАЛЬНЕ ПОЛЕ НАПРУЖЕНЬ" З ТРИКУТНОЮ ЕПЮРОЮ ПЕРЕМИКАННЯ НАПРУЖЕНЬ У ЗОНІ ПЕРЕХОДУ

B.3 "RADIAL STRESS FIELD" WITH TRIANGULAR SWITCH STRESS AT THE TRANSITION

$$p = p_1 \frac{z}{h_1} \qquad \text{для} \quad \text{for} \quad 0 < z < h_1 \tag{B.7}$$

$$p = \frac{p_1(h-z) - p_2(h_1-z)}{h-h_1} \qquad \text{для} \quad \text{for} \quad h_1 < z < h \tag{B.8}$$

$$\sigma_\theta = p_1\left(\frac{z^2}{3ht}\right)\left(\frac{\tan\beta}{\cos\beta}\right) \qquad \text{для} \quad \text{for} \quad 0 < z < h_1 \tag{B.9}$$

$$\sigma_\theta = \left\{\frac{zp_1(h-z) - p_2(h_1-z)}{t(h-h_1)}\right\}\left(\frac{\tan\beta}{\cos\beta}\right) \qquad \text{для} \quad \text{for} \quad h_1 < z < h \tag{B.10}$$

$$\sigma_\phi = \frac{p_1 z^2}{3th_1}\left(\frac{\tan\beta + \mu}{\cos\beta}\right) \qquad \text{для} \quad \text{for} \quad 0 < z < h_1 \tag{B.11}$$

$$\sigma_\phi = \left\{\frac{2z^3(p_2 - p_1) + \left(3z^2 - h_1^2\right)(hp_1 - h_1 p_2)}{6zt(h-h_1)}\right\}\left(\frac{\tan\beta + \mu}{\cos\beta}\right) \qquad \text{для} \quad \text{for} \quad h_1 < z < h \tag{B.10}$$

у якому p_1 - тиск на висоті h_1 над вищою точкою і p_2 - тиск в зоні переходу.

in which p_1 is the pressure at a height h_1 above the apex and p_2 is the pressure at the transition.

В.4 ТИСК ЗГІДНО ЗАГАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ХОПЕРІВ

Характер баричного поля може бути визначений в показниках нормального тиску p з супутньою силою зчеплення із стінкою бункера μp як:

B.4 GENERAL HOPPER THEORY PRESSURES

The pressure pattern may be defined in terms of the normal pressure p with accompanying wall frictional traction μp as:

$$p = F \cdot q \tag{B.13}$$

$$q = \frac{\gamma h}{n-1}\left[\left(\frac{z}{h}\right) - \left(\frac{z}{h}\right)^n\right] + q_t\left(\frac{z}{h}\right)^n \tag{B.14}$$

$$n = 2 \cdot (F \cdot \mu \cdot \cos\beta + F - 1) \tag{B.15}$$

де F - це коефіцієнт тиску на стінку p аж до напруження по вертикалі в твердому матеріалі q, а q_t – це усереднене вертикальне напруження в твердому матеріалі у зоні переходу :

F is the ratio of wall pressure p to vertical stress in the solid q and q_t is the mean vertical stress in thesolid at the transition:

$$\sigma_\theta = \left[\frac{\gamma h}{(n-1)}\left(\frac{z}{h}\right)^2 + \left(q_t - \frac{\gamma h}{(n-1)}\right)\left(\frac{z}{h}\right)^{n+1}\right]\left(\frac{Fh}{t}\right)\left(\frac{\tan\beta}{\cos\beta}\right) \tag{B.16}$$

$$\sigma_\phi = \left[\frac{\gamma h}{3(n-1)}\left(\frac{z}{h}\right)^2 + \frac{1}{(n+2)}\left(q_t - \frac{\gamma h}{(n-1)}\right)\left(\frac{z}{h}\right)^{n+1}\right]\left(\frac{Fh}{t}\right)\left(\frac{\tan\beta + \mu}{\cos\beta}\right) \tag{B.16}$$

ДОДАТОК С (ДОВІДКОВИЙ) РОЗПОДІЛ ТИСКУ ВІТРУ ВІДНОСНО КОНСТРУКЦІЙ ЦИЛІНДРИЧНОГО БУНКЕРА

Розподіл вітрового тиску відносно приземленого циліндричного бункера або наземного резервуару (див. рисунок С.1) може бути важливим для оцінки вимог до анкерного кріплення і визначення опору втраті стійкості під впливом вітру. В деяких випадках значення, вказані в стандарті EN 1991-1-4, можуть виявитися недостатніми.

Зміну тиску навколо бункера, що стоїть окремо, можна визначити за допомогою кільцевої координати θ, початкова точка якої знаходиться з навітряного боку вітрогенератора (див. рисунок С.2)

Зміну розподілу тиску в кільцевому напрямі (позитивна і спрямована всередину) на відособлений бункер під суцільним дахом (див. рисунок С.2) представлено виразом:

$$C_p = -0,54 + 0,16(d_c / H) + \{0,28 + 0,04(d_c / H)\} \cdot \cos\theta + \{1,04 - 0,20(d_c / H)\} \cos 2\theta - \\ - \{0,14 - 0,05(d_c / H)\} \cdot \cos 4\theta \qquad \text{(C.1)}$$

де d_c це діаметр бункера, а H його загальна висота (H/d_c - це співвідношення геометричних розмірів усієї конструкції і її опор) (див. рисунок С.1). У бункерах, де H/d_c менше 0,50, слід прийняти значення H/d_c = 0,50. Розподіл тиску не повинен грунтуватися на висоті циліндра H_c.

Зміну розподілу тиску в кільцевому напрямі (позитивна і спрямована всередину) на комплекс бункерів під суцільним дахом (див. рисунок С.3) можна прийняти за:

$$C_p = +0,20 + 0,60 \cdot \cos\theta + 0,27 \cdot \cos 2\theta - 0,05 \cdot \cos 3\theta - 0,13 \cdot \cos 4\theta + 0,13 \cdot \cos 6\theta - \\ - 0,09 \cdot \cos 8\theta + 0,07 \cdot \cos 10\theta \qquad \text{(C.2)}$$

ANNEX C: [INFORMATIVE] DISTRIBUTION OF WIND PRESSURE AROUND CIRCULAR SILO STRUCTURES

The distribution of wind pressures around a squat circular silo or ground-supported tank (see figure C.1) can be important to the assessment of anchorage requirements and wind buckling resistance. Values given in EN 1991-1-4 may not provide sufficient detail in certain cases.

The pressure variation around an isolated silo may be defined in terms of the circumferential coordinate θ with its origin at the windward generator (see figure C.2).

Thecircumferential variation of the pressure distribution (positive inward) on an isolated closed roof silo (see figure C.2) is given by:

where d_c is the diameter of the silo and H its overall height (H/d_c is the aspect ratio for the complete structure and its supports) (see figure C.1). For silos with H/d_c less than 0.50, the values for H/d_c = 0.50 should be adopted. The pressure distribution should not be based on the cylinder height H_c.

Thecircumferential variation of the pressure distribution (positive inward) on a closed roof silo in a group (see figure C.3) may be taken as:

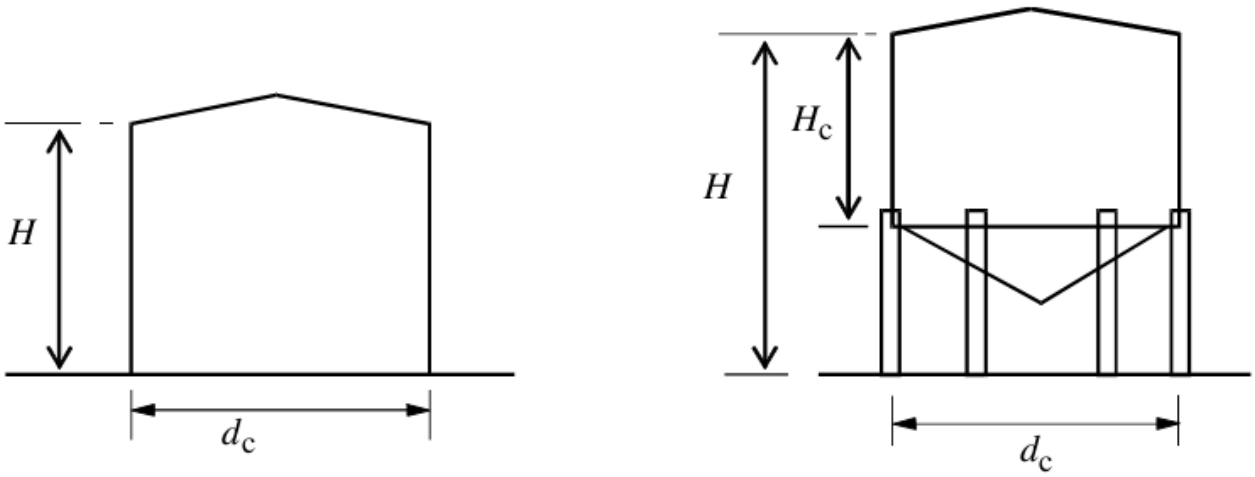


Рисунок С.1 Бункер під вітровим навантаженням
Figure C.1 Wind loaded silo

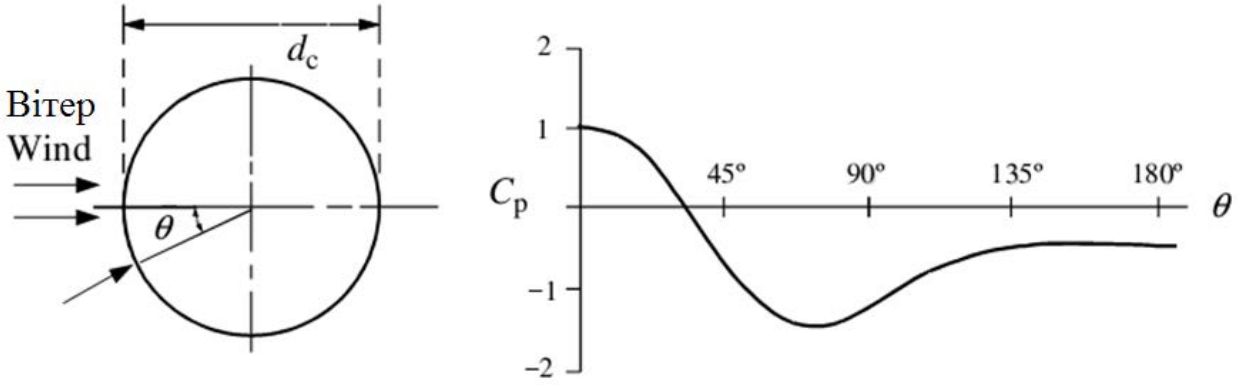


Рисунок С.2 Зміна розподілу тиску відносно півсфери відособленого бункера
Figure C.2 Wind pressure variation around half circumference in isolated silo

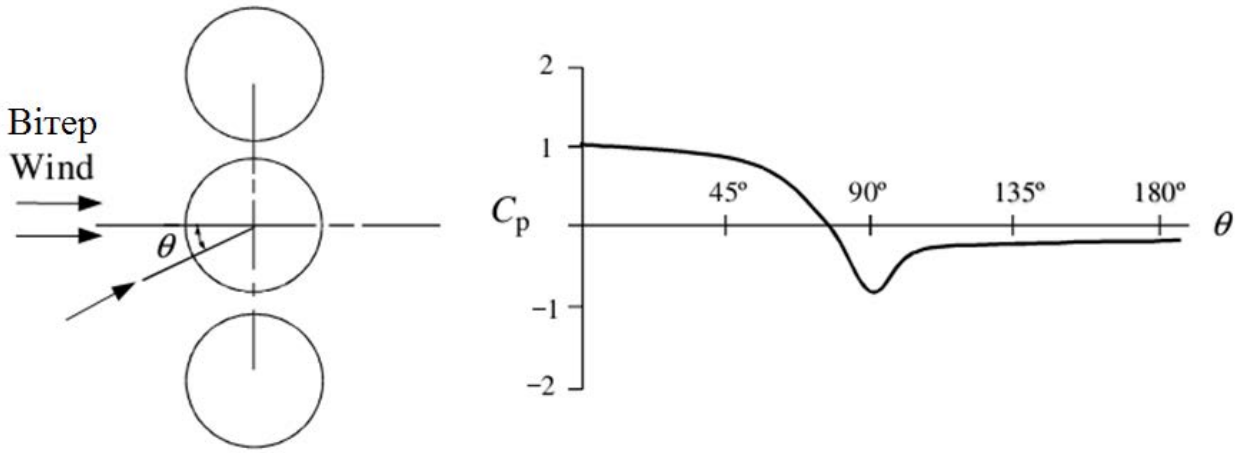


Рисунок С.3 Зміна тиску вітру відносно півсфери бункера в групі
Figure C.3 Wind pressure variation around half circumference of silo in group

Якщо бункер не має суцільного даху, до вказаного вище значення слід додати наступні додаткові уніфіковані значення коефіцієнта внутрішнього вакуумметричного тиску ΔC_p, щоб підвищити тиск гальмування, спрямований всередину:

а) додатковий тиск на бункер з відкритим верхом, спрямований всередину: $\Delta C_p = +0,6_p$;

б) додатковий тиск на бункер з невеликим отвором, обладнаний дихальними клапанами, спрямований всередину: $\Delta C_p = +0,4$.

Примітка: ΔC_p приймається як позитивно спрямований всередину. В даному випадку результуюча величина зовнішнього і внутрішнього тиску на стінку бункера з підвітряного боку бункера близька до нуля.

Where the silo does not have a closed roof, the following additional uniform values of internal underpressure coefficients ΔC_p should be added to the above, thus increasing the net stagnation inward pressure:

a) additional inward pressure on open top silo: $\Delta C_p = +0,6$;

b) additional inward pressure on a vented silo with a small opening: $\Delta C_p = +0,4$

NOTE: ΔC_p is taken as positive inwards. For this case, the resultant of the external and internal pressure on the silo wall is close to zero on the leeward side of the silo.

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 1993-4-1:2007/AC

April 2009

ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.10

English Version

Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 4-1: Silos

Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 4-1: Silos

Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-1: Silos

This corrigendum becomes effective on 22 April 2009 for incorporation in the three official language versions of the EN.

Ce corrigendum prendra effet le 22 avril 2009 pour incorporation dans les trois versions linguistiques officielles de la EN.

Die Berichtigung tritt am 22.April 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 1993-4-1:2007/AC:2009 D/E/F

ЄВРОПЕЙСЬКИЙ СТАНДАРТ
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 1993-4-1:2007/AC

Квітень 2009 рік

ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.10

Англійська версія

Єврокод 3 – Проектування сталевих конструкцій - Частина 4-1: Силоси

Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 4-1: Silos

Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-1: Silos

Це корегування вступає у дію, починаючи з 22 квітня 2009 року для включення у три офіційні мовні версії EN.

Ce corrigendum prendra effet le 22 avril 2009 pour incorporation dans les trois versions linguistiques officielles de la EN.

Die Berichtigung tritt am 22.April 2009 zur Einarbeitung in die drei offiziellen Sprachfassungen der EN in Kraft.

ЄВРОПЕЙСЬКИЙ КОМІТЕТ ПО СТАНДАРИТЗАЦІЇ
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Центр Управління: Авеню Марні 17, B-1000 Брюсель

© 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 1993-4-1:2007/AC:2009 D/E/F

Зміни до EN 1993-4-1:2007/AC:2009 (E)

1) Зміни до «Вступу»

«Додаткова інформація щодо EN 1993-4-1», *останній абзац, замінити посилання на* "2.10" *на* "2.9".
«Національний додаток до EN 1993-4-1», *замінити* "5.4.4 (2), (3) і (4)" *на* "5.4.4 (2), (3)b) і (3)c)".

2) Зміни до 1.1

Пункт «(8)», *замінити* «10 тон» *на* «10 кН (10 тон)»

3) Зміни до 1.2

Посилання на «EN 1991», *у рядку*:
«Частина 1.5 Дії на конструкції. Випадкові дії;» *замінити* «Частина 1.5» *на* «Частина 1.7».
Заголовок «EN 10025», *виправити заголовок на* «Гарячий прокат з конструкційної сталі»
Посилання на «EN 10147», *замінити* «EN 10147» *на* «EN 10149».

4) Зміни до 1.7.1

Пункт «(1)», «Рисунок 1.2», *частина рисунку* «a)», *підзаголовок, замінити* «загальна система координат секції що завантажується;» *на* «глобальна система координат секції що завантажується;»

5) Зміни до 1.7.2

Пункт «(4)», «Рисунок 1.3», *частина рисунку* «a)», *підзаголовок, замінити* «загальна система координат секції що завантажується;» *на* «глобальна система координат секції що завантажується;»

6) Зміни до 2.6

Пункт «(3)», *замінити* «EN 10147» *на* «EN 10149».

Modifications to EN 1993-4-1:2007/AC:2009 (E)

1) Modifications to "Foreword"

"Additional information specific to EN1993-4-1"*, last paragraph, replace the reference* "2.10" *with* "2.9".
"National Annex for EN1993-4-1"*, replace* "5.4.4 (2), (3) and (4)" *with* "5.4.4 (2), (3)b) and (3)c)".

2) Modification to 1.1

Paragraph "(8)"*, replace* "10 tonnes" *with* "100 kN (10 tonnes)".

3) Modifications to 1.2

Reference to "EN 1991"*, in the line:*
"Part 1.5: Actions on structures – Accidental actions;" *replace* "Part 1.5" *with* "Part 1.7".
Title of "EN 10025"*, correct the title into* "*Hot rolled products of structural steels*".
Reference to "EN 10147"*, replace* "EN 10147" *with* "EN 10149".

4) Modification to 1.7.1

Paragraph "(1)"*,* "Figure 1.2"*, Subfigure* "a)"*, Subtitle, replace* "general coordinate system" *with* "global coordinate system".

5) Modification to 1.7.2

Paragraph "(4)"*,* "Figure 1.3"*, Subfigure* "a)"*, Subtitle, replace* "general coordinate system" *with* "global coordinate system".

6) Modification to 2.6

Paragraph "(3)"*, replace* "EN 10147" *with* "EN 10149".

7) Зміни до 4.3.1

Пункт «(8)», «ПРИМІТКА», *замінити* «$n_{ew}=16$» *на* «$n_{ew}=15\varepsilon$».

7) Modification to 4.3.1

Paragraph "(8)", "**NOTE**", *replace* "$n_{ew}=16$" *with* "$n_{ew}=15\varepsilon$".

8) Зміни до 4.3.3

Пункт «(5)», *замінити* «(див. 2.3)» *на* «(див. 2.2)»

8) Modification to 4.3.3

Paragraph "(5)", *replace* "(see 2.3)" *with* "(see 2.2)".

9) Зміни до 4.4

Пункт «(6)», *видалити* «ПРИМІТКУ 2» *та замінити* «ПРИМІТКУ 1» *на* «ПРИМІТКУ».

9) Modification to 4.4

Paragraph "(6)", *delete the whole* "**NOTE 2**" *and replace* "**NOTE 1**" *with* "**NOTE**".

10) Зміни до 5.3.2.3

Пункт «(3)», «ПРИМІТКА», *замінити* «приведені нижче» *на* «приведені в таблиці нижче».
Пункт «(3)», *видалити останнє речення* «ПРИМІТКИ»: «Одностороннє зварне з'єднання внахлест не повинне застосовуватися, якщо більше 20 % значення $\sigma_{e,Ed}$ у виразі 5.4 виводиться з моментів згинання.» *та додати його до «звичайного» пункту* «(3)».

10) Modifications to 5.3.2.3

Paragraph "(3)", "**NOTE**", *replace* "are given in below" *with* "are given in the table below".
Paragraph "(3)", *delete the last sentence of the* "**NOTE**": "The single welded lap joint should not be used if more than 20% of the $\sigma_{e,Ed}$ in expression 5.4 derives from bending moments." *and add it to the "normal"-formatted paragraph* "(3)".

11) Зміни до 5.3.2.6

Пункт «(5)», *рівняння* «(5.55)», *замінити:*

11) Modification to 5.3.2.6

Paragraph "(5)", *Equation* "(5.55)", *replace:*

$$\text{“}l_0=\frac{\tau_{x\theta,Ed,\max}}{\left(\frac{d\cdot\tau_{x\theta,Ed}}{dx}\right)}\text{”} \qquad (5.55)"$$

На (with):

$$\text{“}l_0=\frac{\tau_{x\theta,Ed,\max}}{d\cdot\tau_{x\theta,Ed}/dy}\text{”} \qquad (5.55)"$$

12) Зміни до 5.3.4.1

Пункт «(6)», *видалити* «ПРИМІТКУ 1» *та замінити* «ПРИМІТКУ 2» *на* «ПРИМІТКУ».

12) Modification to 5.3.4.1

Paragraph "(6)", *delete the whole* "**NOTE 1**" *and replace* "**NOTE 2**" *with* "**NOTE**".

13) Зміни до 5.3.4.3.3

Пункт «(5)», *замінити рівняння* «(5.70)»

13) Modifications to 5.3.4.3.3

Paragraph "(5)", *replace Equation* "(5.70)":

$$\text{“}N_{X,Rd}=A_s f_y/\gamma_{M1} \qquad (5.70)\text{”}$$

На наступне (with the following one):

$$\text{“}n_{x,Rd}=A_{eff}\cdot f_y/\left(d_s\cdot\gamma_{M0}\right)\text{”}$$

а також прямо під «де» *додати:*
«d_s - відстань між ребрами жорсткості»
«A_{eff} - ефективна площа поперечного перерізу ребра жорсткості».

and right under "where:"*, add:*
"d_s is the distance between the stringer stiffeners;
A_{eff} is the effective cross-sectional area of the stringer stiffener;".

14) Зміни до 5.4.4

Пункт «(3)»*, замінити «*один з трьох нижченаведених критеріїв» *на* «один з нижченаведених критеріїв»

14) Modification to 5.4.4

Paragraph "(3)"*, replace* "one of the three following criteria" *with* "one of the following criteria".

15) Зміни до 6.3.2.5

Пункт «(5)»*, рівняння* «6.11»*, замінити* «$-\left(\frac{6}{t_h^2}\right)\cdot F_{e,Ed}\cdot x_h$» *на* «$-\left(\frac{6}{t_h^2}\right)\cdot F_h\cdot x_h$».

15) Modification to 6.3.2.5

Paragraph "(5)",*Equation* "(6.11)"*, replace the current last term* "$-\left(\frac{6}{t_h^2}\right)\cdot F_{e,Ed}\cdot x_h$" *with the following one* "$-\left(\frac{6}{t_h^2}\right)\cdot F_h\cdot x_h$".

16) Зміни до 8.2.3

Пункт «(4)»*, замінити номер рівняння «*(8.19)» *на* «(8.19a)».

Пункт «(4)»*, замінити номер рівняння «*(8.20)» *на* «(8.19b)».

Пункт «(4)»*, замінити номер рівняння «*(8.21)» *на «*(8.20)».

Пункт «(4)»*, між рівнянням* «(8.21)» *та «*де (див. рисунок 8.6):»*, додати наступні нові рівняння:*

16) Modifications to 8.2.3

Paragraph "(4)"*, replace equation number* "(8.19)" *with* "(8.19a)".

Paragraph "(4)"*, replace equation number* "(8.20)" *with* "(8.19b)".

Paragraph "(4)"*, replace equation number* "(8.21)" *with* "(8.20)".

Paragraph "(4)"*, between Equation* "(8.21)" *and* "where (see figure 8.6):"*, add the following new equations:*

"$$n_{v,Ed} = n_{xc,Ed} + n_{\phi x,Ed}\cos\beta \qquad (8.21a)$$

$$n_{r,Ed} = n_{\phi h,Ed}\sin\beta \qquad (8.21b)$$"

Пункт «(4)»*, у рівняннях* «(8.19a)» *до і включаючи* «(8.25)» *[окрім нововведених формул* «(8.21a)» *та* «(8.21b)»*], замінити* «$n_{xc,Ed}$» *на* «$n_{v,Ed}$».

Paragraph "(4)"*, in Equations* "(8.19a)" *up to and including* "(8.25)" *[except in the newly inserted formulae* "(8.21a)" *and* "(8.21b)"*], replace* " xc,Ed n " *with* " v,Ed n ".

Пункт «(4)»*, у рівняннях* «(8.19a)» *до і включаючи* «(8.25)» *[окрім нововведених формул* «(8.21a)» *та* «(8.21b)»*], замінити* «$n_{\phi h,Ed}$ nυ» *замінити* «$n_{r,Ed}$».

Paragraph "(4)"*, in Equations* "(8.19a)" *up to and including* "(8.25)" *[except in the newly inserted formulae* "(8.21a)" *and* "(8.21b)"*], replace* " $n_{\phi h,Ed}$ nυ " *with* " $n_{r,Ed}$ ".

17) Зміни до 8.3.2.3

Пункт «(2)», *рівняння* «8.27», *замінити* «l_{eh}» *на* «l_{oh}».

18) Зміни до 8.3.4.4

Пункт «(2)», *рівняння* «(8.42)», *замінити* «σ_p» *на* «σ_c».

19) Зміни до 9.2.3

Пункт «(1)», «ПРИМІТКА», *замінити* «показані на рисунках 9.1, 9.2 і 9.3» *на* «показані на рисунках 9.1 і 9.2»

20) Зміни до 9.4.1

Пункт «(2)», *замінити* «передбачає застосування» на «передбачає застосування (див. рисунок 9.3)».

21) Зміни до 9.5.2

Пункт «(5)», *замінити* «бути погоджений з проектною організацією і/або виробником» *на* «бути погоджений з замовником, проектною організацією і виробником».

22) Зміни до А.3.2.1

Пункт «(6)», «ПРИМІТКА», *замінити текст примітки наступним:* «Значення j_i може встановлюватися в Національному додатку. Рекомендовані значення j_i надані у таблиці нижче для різних конфігурацій з`єднань. Не дозволяється використовувати поодиноке зварне з'єднання внахлест, якщо більше 20% $\sigma_{e,Ed}$ у формулі 5.4 отримано зі згинальних моментів».

23) Зміни до А.3.2.2

Пункт «(2)», *замінити* «$t/2$» *на* «t».

17) Modification to 8.3.2.3

Paragraph "(2)", *Equation* "(8.27)", *replace* "l_{eh}" *with* "l_{oh}".

18) Modification to 8.3.4.4

Paragraph "(2)", *Equation* "(8.42)", *replace* "σ_p" *with* "σ_c".

19) Modification to 9.2.3

Paragraph "(1)", "**NOTE**", *replace* "shown in figures 9.1, 9.2 and 9.3" *with* "shown in figures 9.1 and 9.2".

20) Modification to 9.4.1

Paragraph "(2)", *replace* "should be designed for:" *with* "should be designed for (see figure 9.3):".

21) Modification to 9.5.2

Paragraph "(5)", *replace* "be agreed between the designer and/or the fabricator" *with* "be agreed between the client, the designer and the fabricator".

22) Modification to A.3.2.1

Paragraph "(6)", "**NOTE**", *replace the text of the note with the following one:* "The National Annex may choose the value of j_i. The recommended values of j_i are given in the table below for different joint configurations. The single welded lap joint should not be used if more than 20% of $\sigma_{e,Ed}$ in expression 5.4 derives from bending moments."

23) Modification to A.3.2.2

Paragraph "(2)", *replace* "$t/2$" *with* "t".

ДСТУ-Н Б 1993-4-1:201Х

Код УКНД: 65.040.20; 91.010.30; 91.080.10

Ключові слова: бункери, вогнестійкість, довговічність, матеріали, міцність, придатність, навантаження, проектування.

Генеральний директор ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського», д.т.н., проф.	О. Шимановський
Завідувач НДВТР, (керівник розробки), к.т.н.	А. Гром
Гол.наук.спів., д.т.н	В. Цихановський
Завідувач групи СНТД	Г. Ленда
Завідувач групи ІК	О. Кордун
Завыдувач групи НТД	Я Лимар
Провідний інженер	Я. Левченко
Провідний інженер	В. Артюшенко
Перекладач	К. Павлова