



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ EN 1993-1-5:20__

(EN 1993-1-5:2024, IDT)

ЄВРОКОД 3

ПРОЄКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Частина 1-5. Пластинчасті конструкційні елементи

(Проект, перша редакція)

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
20__

ПЕРЕДМОВА

- 1 РОЗРОБЛЕНО: Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво» (ТК 301)
- 2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від _____. 20__ р. № _____ з 20__ – __ – ____
- 3 Національний стандарт відповідає EN 1993-1-5:2024 «Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements» (Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструкційні елементи) і внесений з дозволу CEN-CENELEC, Rue de la Science 23, B-1040 Brussels, Belgium. Усі права щодо використання європейських стандартів у будь-якій формі й будь-яким способом залишаються за CEN-CENELEC
- Ступінь відповідності – ідентичний (IDT)
- Переклад з англійської (en)
- 4 Цей стандарт розроблено згідно з правилами, установленими в національній стандартизації України
- 5 НА ЗАМІНУ ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012; Зміна №1 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012; ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012/Зміна № 2:2018 (EN 1993-1-5:2006/A1:2017, IDT); ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012/Зміна № 3:2022 (EN 1993-1-5:2006/A2:2019, IDT)

Право власності на цей національний стандарт належить державі.
Заборонено повністю або частково видавати, відтворювати
задля розповсюдження і розповсюджувати як офіційне видання
цей національний стандарт або його частини на будь-яких носіях інформації
без дозволу ДП «УкрНДНЦ» чи уповноваженої ним особи

ДП «УкрНДНЦ», 20XX

ЗМІСТ

Національний вступ.....	C. VII
Передмова до EN 1993-1-5:2024.....	IX
0 Вступ.....	XII
1 Сфера застосування	1
2 Нормативні посилання	2
3 Терміни та визначення понять.....	3
3.1 Терміни.....	4
3.2 Правило застосування знаків.....	6
3.3 Позначки.....	6
4 Основи проєктування.....	9
4.1 Загальні правила	9
4.1.1 Основні вимоги	9
4.2 Часткові коефіцієнти.....	9
4.3 Моделі для визначення ефективної ширини у загальному розрахунку	10
4.4 Ефекти втрати стійкості пластин в елементах із постійним поперечним перерізом.....	12
4.5 Методика розрахунку за приведеним напруженням	14
4.6 Проєктування із застосуванням розрахунку методом скінченних елементів	14
4.7 Конструкційні елементи зі змінним перерізом	15
4.8 Конструкційні елементи з гофрованими стінками	15
5 Урахування ефекту запізнення зсуву в проєктуванні елемента	15
5.1 Загальні положення.....	15
5.2 Запізнення зсуву в пружній стадії.....	16
5.2.1 Ефективна ^s ширина.....	16
5.2.2 Розподіл напружень унаслідок запізнення зсуву	18
5.2.3 Ефекти прикладання навантаги в площині	19
5.3 Запізнення зсуву в граничному стані за несною здатністю.....	20
5.3.1 Врахування запізнення зсуву.....	20
5.3.2 Взаєзв'язок запізнення зсуву та втрати стійкості пластини.....	21
6 Ефекти втрати стійкості пластини внаслідок дії поздовжніх напружень у граничному стані за несною здатністю.....	22
6.1 Загальні положення.....	22

6.2 Опір поздовжнім напруженням	22
6.3 Ефективна площа поперечного перерізу	23
6.4 Пластинчасті елементи без поздовжніх елементів жорсткості.....	26
6.4.1 Втрата стійкості за типом роботи пластини.....	26
6.4.2 Втрата стійкості за типом роботи стрижня	32
6.5 Пластинчасті елементи, підкріплені поздовжніми елементами жорсткості	33
6.5.1 Загальні положення.....	33
6.5.2 Втрата стійкості за типом роботи пластини.....	36
6.5.3 Втрата стійкості за типом роботи стрижня	37
6.6 Інтерполяція між значеннями втрати стійкості за типом роботи пластини і типом роботи стрижня.....	40
6.6.1 Загальні положення.....	40
6.6.2 Альтернативні методи оцінювання вагового коефіцієнта ξ	43
6.6.3 Альтернативний спрощений метод для підданих згину панелей, підкріплених поздовжніми елементами жорсткості.....	48
6.7 Перевіряння	50
7 Опір зсуву	53
7.1 Загальні положення.....	53
7.2 Розрахунковий опір.....	54
7.3 Внесок до несної здатності, утворюваний стінкою	55
7.4 Внесок до несної здатності, утворюваний поясами	59
7.5 Перевіряння	60
8 Опір місцевому розподіленому навантаженню.....	60
8.1 Загальні положення.....	60
8.2 Розрахунковий опір.....	61
8.3 Довжина розподілу навантаги через жорсткі опорні елементи	62
8.4 Понижувальний коефіцієнт χ_F	63
8.5 Ефективна довжина за прикладеної навантаги.....	63
8.6 Перевіряння	64
9 Взаємодія зусиль	65
9.1 Взаємодія зсувного зусилля, згинального моменту й осьового зусилля.....	65
9.2 Взаємодія поперечного зусилля, згинального моменту й осьового зусилля.....	66
9.3 Взаємодія поперечного зусилля, згинального моменту і зсувного зусилля	67
10 Втрата стійкості, спричинена стінкою	68
11 Елементи жорсткості та їхнє деталювання	69

11.1 Загальні положення	69
11.2 Поздовжні напруження	70
11.2.1 Мінімальні вимоги щодо поперечних елементів жорсткості	70
11.2.2 Мінімальні вимоги щодо поздовжніх елементів жорсткості	75
11.2.3 Пластини, приєднані зварним швом	76
11.2.4 Вирізи в елементах жорсткості	77
11.3 Зсув	79
11.3.1 Жорсткий кінцевий стояк	79
11.3.2 Елементи жорсткості, що працюють як нежорсткі кінцеві стояки	80
11.3.3 Проміжні поперечні елементи жорсткості	81
11.3.4 Поздовжні елементи жорсткості	81
11.3.5 Зварні шви	81
11.4 Поперечні навантаги	82
12 Метод розрахунку за приведеним напруженням	83
12.1 Загальні положення	83
12.2 Перевіряння опору втраті стійкості	84
12.3 Гнучкість пластини	86
12.4 Понижувальні коефіцієнти	88
13 Балки з гофрованими стінками	93
13.1 Загальні положення	93
13.2 Граничний стан за несною здатністю	94
13.2.1 Момент внутрішніх зусиль	94
13.2.2 Опір зсуву	96
13.2.3 Опір поперечним силам	97
13.2.4 Взаємодія зсувного зусилля та згинального моменту	99
13.2.5 Взаємодія поперечного зусилля, згинального моменту і зсувного зусилля	99
13.2.6 Вимоги щодо кінцевих елементів жорсткості	100
Додаток А (довідковий) Розрахунок критичних напружень для підкріплених пластин ...	101
А.1 Використання цього довідкового додатка	101
А.2 Сфера застосування та область застосовних значень	101
А.3 Еквівалентна ортотропна пластина, призначена для розрахунку пластин із щонайменше трьома поздовжніми елементами жорсткості	101

А.4 Еквівалентна ортотропна пластина, призначена для розрахунку пластин з одним чи двома поздовжніми елементами жорсткості.....	102
А.5 Коефіцієнти втрати стійкості за зсуву.....	104
А.6 Коефіцієнт втрати стійкості внаслідок місцевого розподіленого навантаження .	105
Додаток В (довідковий) Конструкційні елементи зі змінним перерізом.....	106
В.1 Використання цього довідкового додатка.....	106
В.2 Сфера застосування та область застосовних значень	106
В.3 Загальні положення.....	106
В.4 Зв'язок між втратою стійкості пластини та поперечно-крутильною формою втрати стійкості	107
Бібліографія	108
Додаток НА (довідковий) Перелік національних стандартів України, ідентичних європейським та міжнародним нормативним документам, посилання на які є в цьому стандарті	111

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ EN 1993-1-5:20XX (EN 1993-1-5:2024, IDT) «Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструкційні елементи», прийнятий методом перекладу, – ідентичний щодо EN 1993-1-5:2024 (версія en) «Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements».

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

Цей стандарт розроблено на заміну ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012; Зміна №1 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012; ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012/Зміна № 2:2018 (EN 1993-1-5:2006/A1:2017, IDT); ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2012/Зміна № 3:2022 (EN 1993-1-5:2006/A2:2019, IDT).

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

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- слова «цей європейський стандарт», «ця частина стандарту» і «цей документ» замінено на «цей стандарт»;

- структурні елементи стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Національний вступ», першу сторінку, розділ «Бібліографічні дані» – оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;

- у Вступі, розділі 2 «Нормативні посилання» та «Бібліографії» подано «Національне пояснення», виокремлене рамкою;

- рисунки подано відразу після тексту, де вперше виконано посилання на них, або на наступній сторінці;

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

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

ПЕРЕДМОВА ДО EN 1993-1-5:2024

Цей стандарт (EN 1993-1-5:2024) розроблено Технічним комітетом CEN/TC 250 «Будівельні Єврокоди», секретаріат якого діє за підтримки BSI (*British Standards Institution* – Британський інститут стандартів). CEN/TC 250 є відповідальним за всі будівельні Єврокоди, і на нього організацією CEN покладено відповідальність за питання в сфері конструкційного та геотехнічного проектування.

Цьому стандарту має бути надано статус національного стандарту за публікації ідентичного тексту чи схваленням не пізніше вересня 2027 року, а національні стандарти, положення яких суперечать цьому стандарту, має бути скасовано не пізніше березня 2028 року.

Потрібно звернути увагу на те, що деякі елементи цього стандарту можуть бути предметом патентних прав. CEN не несе відповідальності за ідентифікацію будь-якого чи всіх таких патентних прав.

Цей стандарт уведено на заміну EN 1993-1-5:2006 та змін і поправок до нього.

Комплекс стандартів EN першого покоління Єврокодів було опубліковано у період від 2002 до 2007 року. Цей стандарт є частиною комплексу стандартів другого покоління Єврокодів, які розроблено згідно з дорученням M/515, виданим CEN Європейською комісією та Європейською асоціацією вільної торгівлі.

Ці Єврокоди містять положення, у яких встановлено вимоги щодо виконання конструкцій, використання матеріалів, продукції та випробувань, які призначено для застосування разом із відповідними стандартами на виконання конструкцій, на матеріали, продукцію та випробування.

У Єврокодах зазначено відповідальність кожної з держав-членів ЄС та забезпечено їхнє право за допомогою національних додатків

установлювати на національному рівні значення, пов'язані з нормативними вимогами щодо безпеки.

Нижче наведено основні зміни порівняно з попередньою редакцією стандарту:

- розглянуто крутильну жорсткість елементів жорсткості із замкненим перерізом;
- переглянуто метод інтерполяції між параметрами втрати стійкості за типом роботи пластини і типом роботи стрижня;
- сферу застосування поширено на панелі прямокутної форми;
- із методики розрахункового перевіряння поздовжніх напружень вилучено вимогу щодо врахування наявних поздовжніх елементів жорсткості з низькою жорсткістю;
- переглянуто правила щодо визначення опору місцевому розподіленому навантаженню;
- переглянуто та розширено формули взаємодії зусиль;
- переглянуто правила розрахункового перевіряння поперечних елементів жорсткості;
- переглянуто правила розрахункового перевіряння спричиненої полицею втрати стійкості;
- застосування методу розрахунку за приведеним напруженням поширено на двовісне навантаження;
- розширено обсяг правил, застосовних до конструкційних елементів із гофрованими стінками.

Усі відгуки й запитання щодо цього стандарту має бути спрямовано до національних органів зі стандартизації у країнах користувачів. Повний перелік цих органів опубліковано на веб-сторінці CEN.

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

0 ВСТУП

0.1 Вступ до комплексу Єврокодів

Комплекс будівельних Єврокодів містить зазначені нижче стандарти, що зазвичай складаються з кількох частин:

- EN 1990 Єврокод. Основи будівельного та геотехнічного проєктування;
- EN 1991 Єврокод 1. Дії на конструкції;
- EN 1992 Єврокод 2. Проєктування залізобетонних конструкцій;
- EN 1993 Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій;
- EN 1994 Єврокод 4. Проєктування сталезалізобетонних конструкцій;
- EN 1995 Єврокод 5. Проєктування дерев'яних конструкцій;
- EN 1996 Єврокод 6. Проєктування кам'яних конструкцій;
- EN 1997 Єврокод 7. Геотехнічне проєктування;
- EN 1998 Єврокод 8. Проєктування сейсмостійких конструкцій;
- EN 1999 Єврокод 9. Проєктування алюмінієвих конструкцій;
- нові Єврокоди, що перебувають у стадії розроблення, зокрема, Єврокод із проєктування скляних конструкцій.

0.2 Вступ до EN 1993

EN 1993 (усі частини) застосовують для проєктування будівель і споруд зі сталі. Єврокод відповідає принципам і вимогам щодо безпеки та експлуатаційної придатності конструкцій, основним правилам їхнього проєктування та перевіряння, які викладено в EN 1990 «Основи будівельного та геотехнічного проєктування».

В EN 1993 (усі частини) розглянуто лише вимоги щодо опору, експлуатаційної придатності, довговічності та вогнестійкості сталевих

конструкцій. Інші вимоги, зокрема, щодо тепло- чи звукоізоляції, в Єврокодi не охоплено.

EN 1993 містить такі частини:

- EN 1993-1 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1. Загальні правила і правила для будівель;
- EN 1993-2 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 2. Сталеві мости;
- EN 1993-3 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 3. Башти, щогли і димові труби;
- EN 1993-4 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 4. Силоси і резервуари;
- EN 1993-5 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 5. Палі;
- EN 1993-6 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 6. Підкранові конструкції;
- EN 1993-7 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 7. Проєктування сендвіч-панелей.

EN 1993-1 як документ фізично не існує, він складається із зазначених нижче 14 окремих стандартів, серед яких основною частиною є EN 1993-1-1:

- EN 1993-1-1 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила та правила для будівель;
- EN 1993-1-2 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Протипожежне проєктування конструкцій;
- EN 1993-1-3 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Холодноформовані елементи та профільовані листи;

Примітка. В EN 1993-1-1 охоплено холодноформовані порожнисті профілі, які постачають згідно з EN 10219 (усі частини).

EN 1993-1-4 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-4. Конструкції з нержавкої сталі;

EN 1993-1-5 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-5. Пластинчасті конструкційні елементи;

EN 1993-1-6 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-6. Міцність та стійкість оболонкових конструкцій;

EN 1993-1-7 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-7. Пластинчасті конструкції, навантажувані поза межами площини;

EN 1993-1-8 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-8. Примикання;

EN 1993-1-9 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-9. Втома;

EN 1993-1-10 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-10. Властивості тріщиностійкості й міцності матеріалу у напрямі товщини прокату;

EN 1993-1-11 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-11. Проєктування конструкцій із розтягнутими елементами;

EN 1993-1-12 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-12. Додаткові правила для сталі марок щонайвище до S960;

EN 1993-1-13 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-13. Правила для балок із великими отворами в стінці;

EN 1993-1-14 Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-14. Проєктування із застосуванням розрахунку методом скінченних елементів.

В усіх частинах стандарту від EN 1993-1-2 до EN 1993-1-14 розглянуто загальні теми, незалежно від типу конструкції, наприклад, протипожежне проєктування конструкцій, холодноформовані елементи та

профільовані листи, конструкції з нержавкої сталі, пластинчасті конструкційні елементи тощо.

В усіх частинах стандарту від EN 1993-2 до EN 1993-7 розглянуто теми, що стосуються конкретних типів конструкцій, наприклад, сталеві мости, башти, щогли й димові труби, силоси й резервуари, палі, підкранові конструкції тощо. Частина стандарту від EN 1993-2 до EN 1993-7 містять посилання на загальні правила, викладені в EN 1993-1, а також доповнюють, змінюють чи замінюють їх.

0.3 Вступ до EN 1993-1-5

У EN 1993-1-5 викладено вимоги щодо проєктування непідкріплених і підкріплених пластин, підданих дії зусиль у площині. В ньому охоплено також металеві конструкційні елементи, такі як балки з двотавровим перерізом чи коробчасті балки, а також пластинчасті компоненти, використовувані в резервуарах і силосах.

0.4 Дієслівні форми, які використано в Єврокодах

За допомогою дієслова «shall» виражають вимогу, якої має бути суворо дотримано і від якої, задля досягнення відповідності Єврокодам, не допустимо жодного відхилення.

За допомогою дієслова «should» виражають настійно рекомендований варіант чи спосіб дії. Відповідно до національних регуляторних вимог та/або будь-яких відповідних договірних положень може бути використано/прийнято альтернативні підходи, якщо їхню доцільність технічно обґрунтовано.

За допомогою дієслова «may» виражають спосіб дії, допустимий у межах сфери застосування Єврокодів.

За допомогою дієслова «can» виражають можливість і здатність; його використовують для констатування фактів та роз'яснення понять.

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

Для перекладу цього стандарту використано положення довідкового додатка Е ДСТУ 1.5:2015 «Національна стандартизація. Правила розроблення, викладання та оформлення національних нормативних документів» з урахуванням вимоги щодо дотримання принципу зворотності ідентичного перекладу згідно з ДСТУ 1.7:2015 «Національна стандартизація. Правила та методи прийняття міжнародних і регіональних нормативних документів», зокрема:

– вимоги, яких має бути суворо дотримано і від яких не допустимо жодного відхилення, сформульовано за допомогою висловів: «(не) потрібно + дієслово в неозначеній формі», «потрібно, щоб + стверджувальний вислів»; «(не) треба + дієслово в неозначеній формі», «має(-ють) + дієслово в неозначеній формі»;

– настійно рекомендований вибір чи спосіб дії сформульовано за допомогою висловів: «(не) рекомендовано + дієслово в неозначеній формі», «дієслово у формі 3 особи множини в безособовому значенні» (як усталена практика, рекомендована за умовчанням);

– спосіб дії, (не) допустимий у межах сфери застосування стандарту, сформульовано за допомогою вислову: «(не) допустимо + дієслово в неозначеній формі»; «(не) можна + дієслово в неозначеній формі»;

– спосіб дії, (не) можливий чи такий, що обумовлено (не) здатністю суб'єкта дії або (не) придатністю об'єкта дії для реалізації поставленої цілі, сформульовано за допомогою висловів: «(не) можливо + дієслово в неозначеній формі» «(не) може бути + дієслово в безособовій формі».

0.5 Національний додаток до EN 1993-1-5

Цей стандарт містить параметри, визначення яких допустимо на національному рівні, якщо про це чітко зазначено в примітках. Призначення параметрів, які визначають на національному рівні, означає обрання значень для національно визначених параметрів (*Nationally Determined Parameters, NDP*).

Національний стандарт, який імплементує EN 1993-1-5, може мати національний додаток, що містить усі визначені на національному рівні параметри, які має бути використано для проєктування будівель і споруд, що буде зведено у відповідній країні.

Якщо відкриті для національного вибору параметри не визначено на національному рівні, то, за умовчанням, потрібно використовувати значення параметрів, подані у цьому стандарті.

Якщо відкриті для національного вибору параметри не визначено на національному рівні, а в цьому стандарті не подано застосовні за умовчанням значення параметрів, то параметри на національному рівні може бути визначено компетентним органом влади, або ж, якщо й ним не визначено ці параметри, то їх мають узгодити відповідні сторони-учасники конкретного проєкту.

Визначення на національному рівні параметрів, зазначених у EN 1993-1-5, дозволено за такими пунктами:

4.6(2); 6.4.1(10); 7.1(2)

В EN 1993-1-5 відкритими для застосування на національному рівні є такі довідкові додатки:

додаток А; додаток В.

Національний додаток може містити, безпосередньо чи за допомогою посилання, додаткову інформацію, що не суперечить положенням стандарту і призначена для спрощення процесу його впровадження, не змінюючи жодним чином будь-яких положень Єврокодів.

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ЄВРОКОД 3. ПРОЄКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ЧАСТИНА 1-5. ПЛАСТИНЧАСТІ КОНСТРУКЦІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ**EUROCODE 3 – DESIGN OF STEEL STRUCTURES –**
PART 1-5: PLATED STRUCTURAL ELEMENTS

Чинний від 20XX-XX-XX**1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ****1.1 Сфера застосування EN 1993-1-5**

(1) У цьому стандарті викладено правила будівельного проєктування підкріплених і непідкріплених номінально плоских пластин, які піддано дії зусиль у площині.

(2) У стандарті розглянуто нерівномірний розподіл напруження внаслідок запізнення зсуву, прикладення навантаги в площині та втрати стійкості пластини. Ефекти навантаження поза площиною сферою застосування цього стандарту не охоплено.

Примітка 1. Викладені в цьому стандарті правила доповнюють правила, застосовні до перерізів класів 1, 2, 3 та 4, див. EN 1993-1-1.

Примітка 2. Щодо проєктування гнучких пластин, підданих повторюваній дії поздовніх та/або зсувних напружень, а також втомлювальній дії унаслідок згину пластинчастих елементів із площини («дихання»), див. EN 1993-2 та EN 1993-6.

Примітка 3. Щодо ефектів навантаження поза площиною і комбінації ефектів навантаження у площині й поза площиною див. EN 1993-2 та EN 1993-1-7.

(3) Одиничні пластинчасті елементи вважають номінально плоскими, якщо радіус кривизни r у напрямку, перпендикулярному стиску, задовольняє критерій, зазначений на рисунку 1.1:

$$r \geq \frac{b^2}{t}, \quad (1.1)$$

де

b – ширина площини пластини (панелі);

t – товщина пластини.

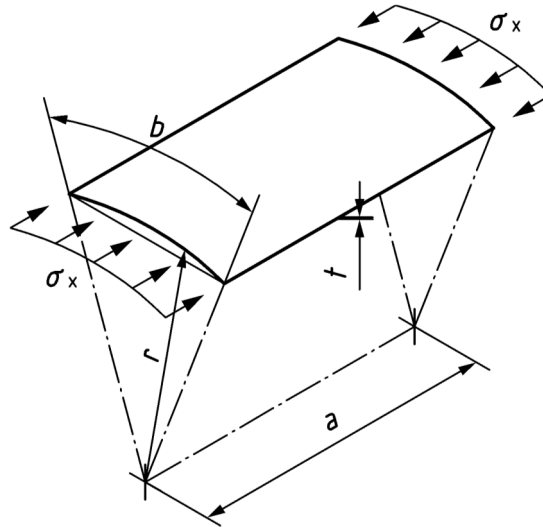


Рисунок 1.1 – Визначення кривизни пластини

1.2 Припущення

(1) Якщо не зазначено інше, застосовують припущення згідно з EN 1990, EN 1991 (всі частини) та EN 1993-1-1.

(2) Викладені в EN 1993-1-5 методи проектування застосовують за дотримання таких умов:

- якість виконання конструкцій відповідає вимогам EN 1090-2, та
- використовувані конструкційні матеріали й вироби відповідають застосовним частинам стандарту EN 1993 або специфікаціям на використовувані матеріали.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Цей стандарт містить посилання на зазначені нижче документи у такий спосіб, що частина або весь їхній зміст обґрунтовує викладені в ньому вимоги. У разі датованих посилань застосовують тільки наведені видання. У разі недатованих посилань потрібно користуватись останнім виданням нормативних документів (разом зі змінами).

Примітка. У Бібліографії подано перелік інших документів, посилання на які зазначено в цьому стандарті, але які не є нормативними, та тих, що наведено як рекомендовані (тобто в пунктах, сформульованих як рекомендації за використання дієслова «should») чи дозволені варіанти/способи дії (за використання дієслова «may»).

EN 1090-2 Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures

EN 1990 Eurocode – Basis of structural and geotechnical design

EN 1991 (all parts) Eurocode 1 – Actions on structures

EN 1993-1-1:2022 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 1090-2 Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 2. Технічні вимоги до сталевих конструкцій

EN 1990 Єврокод. Основи будівельного та геотехнічного проектування

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

EN 1993-1-1:2022 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій

Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Частина 1-1. Загальні правила і правила для будівель

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У цьому стандарті вжито подані нижче терміни та визначення позначених ними понять.

3.1 Терміни

3.1.1 пластина (*plate*)

Конструкційний елемент, який, у загальній ситуації, має два великі розміри a і b та постійний значно менший розмір t , а також має таку форму, за якої два великі розміри вимірюють в одній площині

3.1.2 пружне критичне напруження (*elastic critical stress*)

Напруження в конструкційному елементі, досягнувши якого конструкційний елемент втрачає стійкість, згідно з розрахунком у складі ідеальної конструкції із застосуванням теорії малих пружних прогинів

3.1.3 мембранне напруження (*membrane stress*)

Напруження у серединній площині пластини

3.1.4 поперечний переріз бруто (*gross cross-section*)

Загальна площа поперечного перерізу конструкційного елемента, але без урахування переривчастих поздовжніх елементів жорсткості

3.1.5 ефективна площа поперечного перерізу й ефективна ширина (*effective cross-section and effective width*)

Площа поперечного перерізу бруто чи ширина, зменшені для урахування нерівномірного розподілу напружень унаслідок втрати стійкості пластини, запізнення зсуву чи їхньої сумісної дії.

Примітка 1. Щоб виокремити різні ефекти, термін «ефективний» застосовують у таких значеннях:

- «ефективний^p», яким зазначають ефекти втрати стійкості пластини;
- «ефективний^s», яким зазначають ефекти запізнення зсуву;
- «ефективний», яким зазначають ефекти втрати стійкості пластини та запізнення зсуву

3.1.6 пластинчастий конструкційний елемент (*plated structural element*)

Конструкційний елемент, складений із номінально плоских пластин, з'єднаних одна з одною.

Примітка 1. Пластини можуть бути підкріпленими чи непідкріпленими

3.1.7 елемент жорсткості (*stiffener*)

Пласка пластина або призматичний елемент, прикріплені до пластини для запобігання втраті стійкості чи для підкріплення пластини.

Примітка 1. Елементи жорсткості поділяють на:

– поздовжні, якщо їх розташовано вздовж елемента, утвореного зі складених пластин;

– поперечні, якщо їх розташовано впоперек елемента, утвореного зі складених пластин.

3.1.8 підкріплена пластина (*stiffened plate*)

Пластина з поперечними чи поздовжніми елементами жорсткості, або з тими й іншими

3.1.9 субпанель (*subpanel*)

Непідкріплена частина пластини, обмежена полицями та/або елементами жорсткості

3.1.10 бісталева балка (*hybrid girder*)

Балка, у якій полиці та стінку(и) виготовлено з різних марок сталі

3.1.11 поздовжні напруження (*direct stresses*)

Нормальні напруження, що діють у напрямку поздовжньої осі елемента

3.1.12 місцеве розподілене навантаження (*patch loading*)

Місьцеве навантаження, що діє у певній площині

3.1.13 втрата стійкості за типом роботи пластини (*plate buckling behaviour*)

Втрата стійкості пластини, під час якої виникають розтягувальні напруження другого порядку у напрямку, перпендикулярному до дії навантаги, створюючи сприятливий ефект для опору

3.1.14 втрата стійкості за типом роботи стрижня (*column buckling behaviour*)

Втрата стійкості пластини, під час якої не виникає розтягувальних напружень у напрямку, перпендикулярному до дії навантаги. Це створює ситуацію, подібну до втрати стійкості стрижня

3.1.15 місцева втрата стійкості (*local buckling*)

Втрата стійкості непідкріпленої пластини або частини підкріпленої пластини між двома елементами жорсткості чи між кромкою і елементом жорсткості

3.1.16 загальна втрата стійкості (*global buckling*)

Втрата стійкості підкріпленої пластини разом зі зміщенням елементів жорсткості

3.2 Правило застосування знаків

Якщо не зазначено інше, стиск приймають із додатним знаком

3.3 Позначки

A_{sl} – сумарна площа поперечних перерізів бруто всіх поздовжніх елементів жорсткості підкріпленої пластини без урахування внеску прилеглих ділянок стінки;

A_{st} – площа поперечного перерізу бруто одного поперечного елемента жорсткості;

A_c – площа поперечного перерізу бруто в зоні стиску пластини. У разі підкріплених пластин частини

субпанелей, підтримувані прилеглими пластинами, у значенні A_c не враховують;

A_{eff} – ефективна площа поперечного перерізу;

$A_{c,eff}$ – ефективна^p площа поперечного перерізу в зоні стиску підкріпленої пластини;

$A_{c,eff,loc}$ – ефективна^p площа поперечного перерізу в зоні стиску з урахуванням лише місцевої втрати стійкості;

a – розмір підкріпленої чи непідкріпленої пластини, визначений у напрямку паралельно поздовжньому навантаженню;

b – розмір підкріпленої чи непідкріпленої пластини, визначений у напрямку перпендикулярно поздовжньому навантаженню;

b_0 – ширина перерізу бруто звису поясу (однобічно обпертого елемента) чи половина ширини внутрішнього (двобічно обпертого) елемента;

b_g – загальна ширина в зоні стиску, що відповідає $A_{c,eff}$;

b_{eff} – ефективна^p ширина для врахування ефекту місцевої втрати стійкості;

$b_{eff,sl}$ – ефективна^s ширина для врахування ефекту запізнення зсуву в пружній стадії;

b_c – ширина в зоні стиску пластини;

F_{Ed} – розрахункове значення поперечної сили;

F_{Rd} – розрахунковий опір місцевій втраті стійкості за дії поперечних сил;

h_w – висота стінки, виміряна в просвіті між полицями (поясами);

L_e – ефективна довжина для врахування запізнення зсуву;

ℓ_y – ефективна довжина у навантаженому стані для врахування опору місцевому розподіленому навантаженню;

$M_{f,Rd}$ – розрахункове значення пластичного моменту внутрішніх

зусиль у поперечному перерізі, що охоплює ефективні площі лише поясів;

$M_{f,eff,Rd}$ – розрахункове значення пластичного моменту внутрішніх зусиль у поперечному перерізі, що охоплює ефективні площі поясів і повну ефективну площу перерізу стінки, незалежно від класу перерізу;

$M_{pl,Rd}$ – розрахункове значення пластичного моменту внутрішніх зусиль в усьому поперечному перерізі, незалежно від класу перерізу;

M_{Ed} – розрахункове значення згинального моменту;

N_{Ed} – розрахункове значення осьової сили;

s_s – довжина розподілу навантаги на пояс через жорстко сполучені опорні елементи, застосовувана для перевіряння на місцеве розподілене навантаження;

t – товщина пластини;

V_{Ed} – розрахункове значення поперечної сили для урахування згину з крученням;

W_{eff} – пружний момент опору ефективного поперечного перерізу в розглядуваній точці;

β – коефіцієнт ефективної^s ширини для врахування запізнення зсуву;

$\bar{\lambda}_p$ – умовна гнучкість пластини для врахування поздовжнього навантаження;

$\bar{\lambda}_w$ – умовна гнучкість пластини для врахування втрати стійкості за зсуву;

σ_1 – абсолютне значення максимального стискального напруження на одній кромці підданої стиску пластини;

σ_2 – напруження на кромці, протилежній щодо кромки, де досягнуто значення σ_1 ; його враховують із додатним

знаком у разі стиску та з від'ємним знаком у разі розтягу;
 σ_x – напруження у площині, які діють паралельно напрямку
 поздовжнього навантаження;
 σ_z – напруження у площині, які діють перпендикулярно
 напрямку поздовжнього навантаження.

Інші позначки визначено в тих місцях тексту, де їх уперше застосовано.

4 ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ

4.1 Загальні правила

4.1.1 Основні вимоги

(1) Проєктування сталевих пластинчастих конструкційних елементів має відповідати загальним правилам, установленим в EN 1990 та EN 1991 (всі частини), а також специфічним положенням щодо проєктування сталевих конструкцій, поданим в EN 1993-1-1.

(2) Сталеві конструкції, запроєктовані згідно з цим стандартом, мають бути виконані згідно з EN 1090-2 з використанням будівельних матеріалів і виробів, як зазначено у відповідних частинах EN 1993 або у застосовних технічних умовах щодо матеріалів і виробів.

(3) Ефекти запізнення зсуву та втрати стійкості пластини має бути введено до розрахунку за граничними станами експлуатаційної придатності та несної здатності, включно з втомою, якщо застосовно.

4.2 Часткові коефіцієнти

(1) Часткові коефіцієнти, визначені в EN 1993-1-1, застосовують до таких характеристичних значень опору:

- Опір поздовжнім напруженням γ_{M0}
- Опір зсуву γ_{M1}

- Опір місцевому розподіленому навантаженню γ_{M1}
- Опір поперечних елементів жорсткості γ_{M1}
- Опір, обчислений методом приведених напружень γ_{M1}
- Опір стиснутих поясів балки з гофрованими стінками в ситуації, в якій визначальною є втрата стійкості за крутильно-згинальною формою γ_{M1}

(2) Значення часткових коефіцієнтів γ_{M0} та γ_{M1} мають бути встановлені у Національних додатках до відповідних частин від EN 1993-1 до EN 1993-6.

4.3 Моделі для визначення ефективної ширини у загальному розрахунку

(1) У загальному розрахунку має бути враховано ефекти запізнення зсуву та втрати стійкості пластини, які впливають на жорсткість елементів і примикань.

(2) Ефекти запізнення зсуву балкових поясів у загальному розрахунку можна врахувати, застосовуючи ефективну^s ширину. Для спрощення цю ефективну^s ширину можна вважати постійною за всією довжиною прогону.

(3) Для кожного балкового прогону приймають ефективну^s ширину поясів, що дорівнює меншому зі значень: загальній ширині поясу чи $L/8$ з кожного боку ферми, де L – прогін чи подвійна відстань від опори до кінця консолі.

(4) Ефекти втрати стійкості пластини в пружному загальному розрахунку можна врахувати, застосовуючи ефективну^p площу поперечного перерізу підданих стиску елементів, див. 6.3.

(5) Щоб обчислити значення ефективної площі, пов'язані з жорсткістю, гнучкість $\bar{\lambda}_{p,ser}$ у граничному стані експлуатаційної придатності можна розрахувати за формулою:

$$\bar{\lambda}_{p,ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{f_y}}, \quad (4.1)$$

де

$\sigma_{com,Ed,ser}$ — визначають як максимальне стискальне напруження (розраховане із застосуванням ефективного перерізу) у відповідному елементі, на який діють навантаги у граничному стані експлуатаційної придатності.

(6) Момент інерції площі в граничному стані експлуатаційної придатності можна розрахувати методом інтерполяції поперечного перерізу брутто й ефективного поперечного перерізу за відповідної комбінації навантаж, використовуючи формулу:

$$I_{eff} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{\sigma_{com,Ed,ser}} (I_{gr} - I_{eff}(\sigma_{com,Ed,ser})), \quad (4.2)$$

де

I_{gr} — момент інерції площі поперечного перерізу брутто;

σ_{gr} — максимальне згинально-стискальне напруження в граничних станах експлуатаційної придатності за відповідного поперечного перерізу брутто;

$I_{eff}(\sigma_{com,Ed,ser})$ — момент інерції площі ефективного поперечного перерізу з урахуванням місцевої втрати стійкості згідно з 6.4.1(7), що визначають за умови максимального напруження $\sigma_{com,Ed,ser} \geq \sigma_{gr}$ в межах довжини розглядуваного прогону, використовуючи приведену гнучкість, визначену за формулою (4.1).

(7) Момент інерції площі ефективного поперечного перерізу, I_{eff} , може бути прийнятий уздовж прогону як змінний у місцях із найбільш несприятливими умовами. Як альтернативний варіант, можна

використати постійне значення, яке ґрунтується на максимальному абсолютному значенні згинального моменту, що спричиняє провисання під навантагою в умовах експлуатаційної придатності.

(8) Розрахунки, описані в (5) і (6), потребують ітеративного підходу, однак як наближений варіант за консервативного підходу, допустимо виконувати єдиний розрахунок, результатом якого є напруження, що дорівнює чи перевищує $\sigma_{com,Ed,ser}$.

(9) У разі загального розрахунку ефект втрати стійкості пластини щодо жорсткості можна не враховувати, якщо ефективна^p площа поперечного перерізу підданого стиску елемента в граничному стані за несною здатністю перевищує 0,5 площі поперечного перерізу брутто того самого елемента. Цей критерій поширюється на всі окремо розглядувані пластини поперечного перерізу.

4.4 Ефекти втрати стійкості пластин в елементах із постійним поперечним перерізом

(1) Моделі з визначення ефективної^p ширини за дії поздовжніх напружень, моделі з визначення опору зсуву і втраті стійкості за поперечних навантаг, а також взаємозв'язок цих моделей для визначення опору елементів із постійним поперечним перерізом у граничному стані за несною здатністю можна застосовувати, якщо:

- панелі є прямокутними, а пояси – паралельними;
- діаметр будь-якого непідкріпленого відкритого отвору чи вирізу не перевищує $0,05b$, де b – ширина панелі.

(2) Якщо панель є непрямокутною, але в ній значення кута ϕ (див. рисунок 4.1) дорівнює 10° чи менше, то для розрахунку застосовних понижувальних коефіцієнтів допустимо приймати умовну прямокутну панель, вважаючи базовим значенням ширини b більше з двох значень: b_1 чи b_2 (згідно з рис. 4.1).

(3) Якщо панель є непрямокутною, у якій значення кута ϕ перевищує 10° , але менше чи дорівнює $17,5^\circ$, застосовують правила, викладені в 6.7(5).

Примітка. Коефіцієнт критичної навантаги у пружній стадії, α_{cr} , можна розрахувати, розглядаючи або прямокутну панель із більшою шириною, або її реальну конічну форму та відповідні напруження на кромках. Оскільки розподіл напружень змінюється за різних поперечних перерізів унаслідок звуження (конічності форми), то це може призвести до різних значень гнучкості пластини $\bar{\lambda}_p$ за різних поперечних перерізів. Визначення понижувального коефіцієнта див. у 6.4.1(1), а визначення α_{cr} – у 12.3(1).

(4) Щодо непрямокутних панелей, в яких кут ϕ становить більше $17,5^\circ$, див. 4.7.

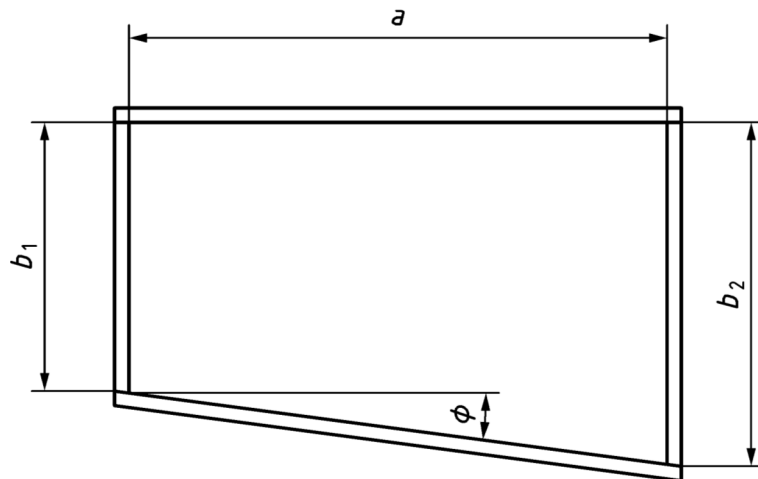


Рисунок 4.1 – Визначення кута ϕ

(5) Для розрахунку напружень у граничному стані експлуатаційної придатності та за втомною міцністю можна застосовувати ефективну^s площу, якщо дотримано умови 4.3(9). Для перевіряння на відповідність умовам граничного стану за несною здатністю застосовують ефективну площу згідно з 5.3, замінивши β на β_{ult} .

4.5 Методика розрахунку за приведеним напруженням

(1) Як альтернативний варіант щодо використовуваних моделей з визначення ефективної^p ширини для перевіряння відповідності умовам напружених станів, зазначених у розділах з 6 по 9, допустимо

прийняти умовні поперечні перерізи класу 3 за дотримання критерію, за якого напруження в кожній панелі не перевищуватимуть граничних значень, установлених у розділі 12.

Примітка. Метод приведених напружень є аналогічним методу розрахунку із застосуванням ефективної^p ширини (див. 4.4), застосовному до окремих пластинчастих елементів. Але для перевіряння відповідності граничних значень напружень приймають припущення, згідно з яким перерозподіл (з)ниження навантаги між пластинчастими елементами поперечного перерізу не відбуватиметься.

4.6 Проєктування із застосуванням розрахунку методом скінченних елементів

(1) Розрахунок методом скінченних елементів для обчислення критичних напружень втрати стійкості та перевіряння відповідності умовам граничних станів за несною здатністю, експлуатаційною придатністю чи втомною міцністю виконують із дотриманням правил, поданих в EN 1993-1-14.

(2) Оцінювання результатів числового моделювання виконують згідно з EN 1993-1-14.

Примітка. Значення максимально допустимої пластичної деформації ε_{mp} становить 5%, якщо в Національному додатку не зазначено інше.

4.7 Конструкційні елементи зі змінним перерізом

(1) Конструкційні елементи зі змінним перерізом (наприклад, елементи з вутами чи непрямокутні панелі, в яких кут ϕ становить більше $17,5^\circ$), або елементи зі звичайними чи збільшеними порівняно з номінальним розміром отворами можна розрахувати із застосуванням методу скінченних елементів (*Finite Element method; FE*).

Примітка. Рекомендації для елементів зі змінним перерізом викладено також у додатку В.

4.8 Конструкційні елементи з гофрованими стінками

(1) Згинальну жорсткість елементів із гофрованими стінками визначають, застосовуючи лише пояси, а стінки розглядають як такі, що передають зсувні та поперечні навантаги. Щодо розрахунку балок із гофрованими стінками див. розділ 13.

5 УРАХУВАННЯ ЕФЕКТУ ЗАПІЗНЕННЯ ЗСУВУ В ПРОЄКТУВАННІ ЕЛЕМЕНТА

5.1 Загальні положення

(1) Ефект запізнення зсуву в поясах можна не враховувати за умови, що $b_0 < L_e/50$, де b_0 приймають як загальну ширину (включно зі звисом) пояса або половину ширини внутрішнього (двобічно обпертого) елемента, а L_e дорівнює довжині відстані між точками нульового згинального моменту, див. 5.2.1(2).

(2) Якщо зазначене вище граничне значення b_0 перевищено, то ефекти запізнення зсуву полиць ураховують під час перевіряння відповідності умовам граничного стану експлуатаційної придатності та втомної міцності, застосовуючи ефективну^s ширину згідно з 5.2.1 та розподіл напружень згідно з 5.2.2. Для перевіряння відповідності умовам граничного стану за несною здатністю можна використовувати ефективну площу згідно з 5.3.

(3) Напруження, спричинені місцевим розподіленням навантаженням на стінку, прикладеним на рівні поясу, визначають відповідно до 5.2.3.

5.2 Запізнення зсуву в пружній стадії

5.2.1 Ефективна^s ширина

(1) Ефективну^s ширину $b_{\text{eff},sl}$ для врахування запізнення зсуву в пружній стадії визначають за формулою:

$$b_{\text{eff},sl} = \beta b_0 \quad (5.1)$$

де коефіцієнт ефективної^s ширини β зазначено в таблиці 5.1.

Цю ефективну^s ширину застосовують для оцінювання експлуатаційної придатності та втомної міцності в граничних станах.

(2) За умови, що суміжні прогони відрізняються не більше ніж на 50 %, а довжина будь-якої консолі не перевищує половини суміжного прогону, ефективну довжину L_e можна визначити згідно з рисунком 5.1. У всіх інших ситуаціях L_e приймають як відстань між сусідніми точками нульового згинального моменту.

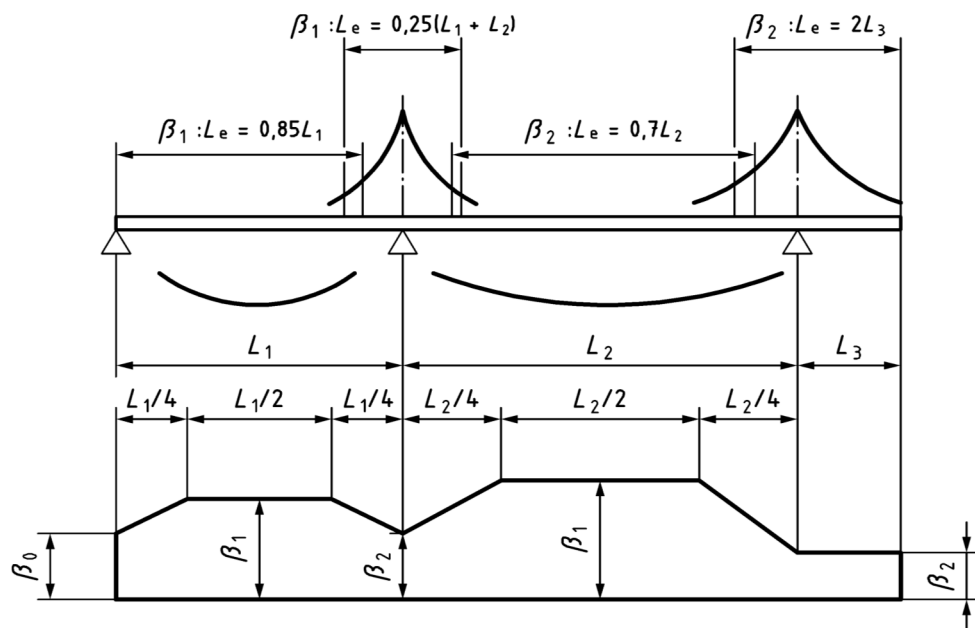
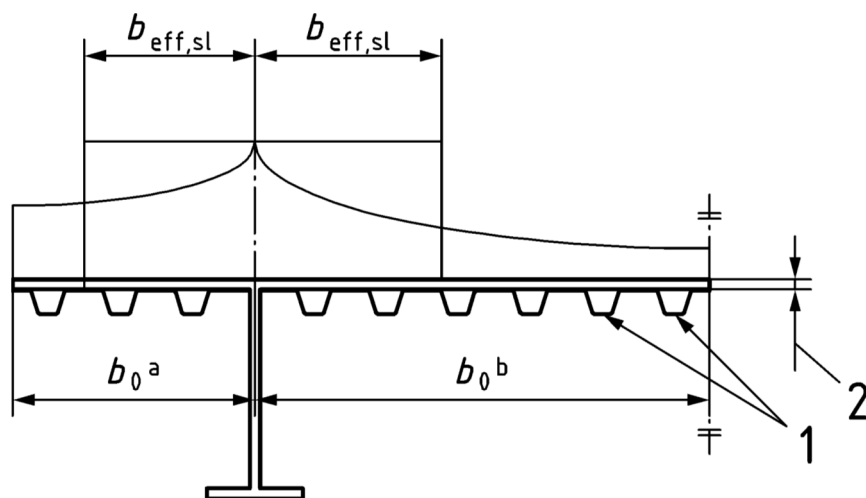


Рисунок 5.1 – Визначення ефективної довжини L_e нерозрізної балки та розподілу ефективної^s ширини



Умовні позначки:

- ^a – позначка для звису пояса з однобічним обпиранням;
^b – позначка для внутрішньої (двобічно обпертої) частини пояса;
 1 – елементи жорсткості, у яких $A_{s\ell} = \Sigma A_{s\ell,i}$;
 2 – товщина пластини t ;

Рисунок 5.2 – Застосування познач для визначення запізнення зсуву

Таблиця 5.1 – Коефіцієнт ефективної^s ширини β

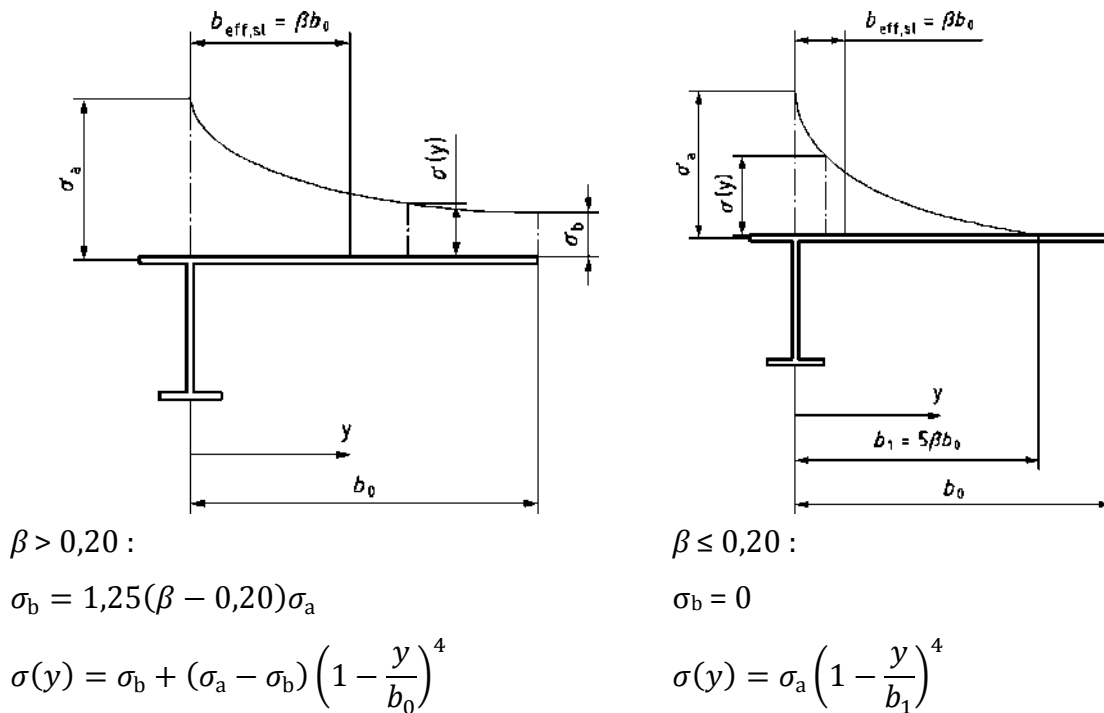
κ	Перевіряння	Значення β
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	Згин із провисанням	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	Згин із випинанням	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2 \cdot 500\kappa} \right) + 1,6\kappa^2}$
$\kappa > 0,70$	Згин із провисанням	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9\kappa}$
	Згин із випинанням	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6\kappa}$
Усі κ	Кінцева опора	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa) \beta_1$, але $\beta_0 < \beta_1$
Усі κ	Консоль	$\beta = \beta_2$ біля опори та на кінці

Кінець таблиці 5.1

κ	Перевіряння	Значення β
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$, де $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{st}}{b_0 t}}$, у цій формулі A_{st} – площа всіх поздовжніх елементів жорсткості в межах ширини b_0 , а інші позначки подано на рисунках 5.1 та 5.2.		

5.2.2 Розподіл напружень унаслідок запізнення зсуву

(1) Розподіл напружень уздовж листа балкового поясу, спричинений запізненням зсуву, застосовують згідно з рисунком 5.3:



σ_a обчислюють із застосуванням ефективної^s ширини поясу $b_{eff,sl}$

Рисунок 5.3 – Розподіл напружень унаслідок запізнення зсуву

5.2.3 Ефекти прикладання навантаги в площині

(1) Розподіл напружень у пружній стадії підкріпленої чи непідкріпленої пластини, спричинений місцевим прикладанням сил у площині (місцевим розподіленням навантаженням), див. рисунок 5.4, визначають за формулою:

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{Ed}}{b_{eff}(t_w + a_{st,1})}, \quad (5.2)$$

у якій

$$b_{eff} = s_e \sqrt{1 + \left(\frac{z}{s_e n}\right)^2};$$

$$n = 0,636 \sqrt{1 + \frac{0,878 a_{st,1}}{t_w}};$$

$$s_e = s_s + 2t_f,$$

де

$a_{st,1}$ – площа поперечного перерізу бруто елементів жорсткості, підданих поздовжньому навантаженню з розрахунку на одиницю довжини стінки в межах довжини s_e . Її можна визначити як площу елементів жорсткості, розподілених (із розподілом їхньої жорсткості) уздовж інтервалу s_{st} ;

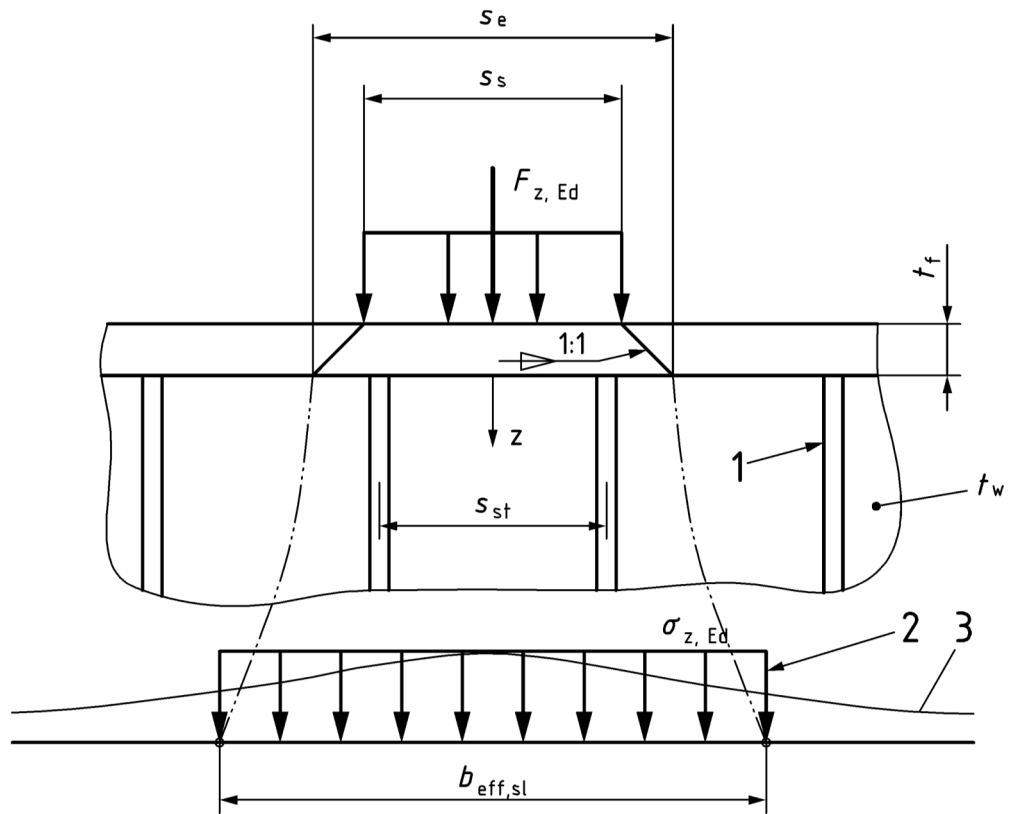
t_w – товщина стінки;

z – відстань до поясу;

s_s – довжина жорстко сполученого опорного елемента;

s_{st} – відстань між елементами жорсткості.

Формулу (5.2) застосовують за умови $s_{st}/s_e \leq 0,5$. В іншій ситуації внесок елементів жорсткості не враховують.



Умовні позначки:

- 1 – елемент жорсткості;
- 2 – спрощене подання розподілу напружень;
- 3 – фактичний розподіл напружень

Рисунок 5.4 – Прикладання навантаги в площині

5.3 Запізнення зсуву в граничному стані за несною здатністю

5.3.1 Врахування запізнення зсуву

(1) У граничному стані за несною здатністю ефекти запізнення зсуву можна визначити одним із таких методів:

а) визначення ефектів запізнення зсуву в пружній стадії за умов граничних станів експлуатаційної придатності та втомної міцності (див. 5.2.1);

б) визначення ефектів запізнення зсуву в пружно-пластичній стадії, застосовуючи перевіряння відповідності допустимих пластичних деформацій, див. (2) та (3).

Примітка. Для визначення ефекту запізнення зсуву в пружній стадії не враховують пружно-пластичний перерозподіл напружень, а застосування цього методу до граничного стану за несною здатністю вважають консервативним підходом.

(2) Якщо у поясах рівень напружень досягає границі текучості, ефекти запізнення зсуву в пружно-пластичній стадії, за допомогою яких враховують допустимі пластичні деформації, можна увести до розрахунку, замінивши β на $\max\{\beta, \beta^k\}$ у формулі (5.1), де β та k визначають із таблиці 5.1.

(3) Правило, викладене в (2), можна застосовувати також до поясів, підданих розтягу.

5.3.2 Взаємозв'язок запізнення зсуву та втрати стійкості пластини

(1) Комбінацію ефектів втрати стійкості пластини та запізнення зсуву можна врахувати, використовуючи A_{eff} , що визначають так:

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{c,eff}} \beta_{\text{ult}}, \quad (5.3)$$

де

$A_{\text{c,eff}}$ – ефективна^p площа поясу, підданого стиску внаслідок втрати стійкості пластини (див. 6.4 та 6.5);

β_{ult} – коефіцієнт ефективної^s ширини для врахування ефекту запізнення зсуву в пружній стадії у граничному стані за несною здатністю, значення β якого можна прийняти з таблиці 5.1, а також замінити α_0 на таке:

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{\text{c,eff}}}{b_g t_f}}; \quad (5.4)$$

t_f – товщина поясу;

b_g – ширина поперечного перерізу бруто в зоні стиску, яка відповідає $A_{\text{c,eff}}$. Значення b_g дорівнює b_0 для звисів елементів, а для внутрішніх (двобічно обпертих) елементів – дорівнює $2b_0$.

(2) У разі застосування ефектів запізнення зсуву в пружно-пластичній стадії A_{eff} можна визначити за формулою:

$$A_{eff} = A_{c,eff} \beta^{\kappa} \geq A_{c,eff} \beta \quad (5.5)$$

6 ЕФЕКТИ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПЛАСТИНИ ВНАСЛІДОК ДІЇ ПОЗДОВЖНИХ НАПРУЖЕНЬ У ГРАНИЧНОМУ СТАНІ ЗА НЕСНОЮ ЗДАТНІСТЮ

6.1 Загальні положення

(1) У цьому розділі викладено правила для врахування ефектів втрати стійкості пластини внаслідок дії поздовжніх напружень у граничному стані за несною здатністю за дотримання таких критеріїв:

- а) панелі є прямокутними, а пояси паралельними або такими, в яких кут не перевищує межі, зазначені в 4.4 та на рисунку 4.1;
- б) елементи жорсткості, за наявності, передбачено в поздовжньому чи поперечному напрямку або в тому й іншому;
- в) відкриті отвори та вирізи мають малі розміри (див. 4.4);
- г) елементи мають постійний поперечний переріз;
- д) не відбувається спричиненої полицею втрати стійкості стінки.

Примітка 1. Щодо втрати стійкості підданого стиску поясу в площині стінки див. розділ 10.

Примітка 2. Щодо елементів жорсткості та деталювання пластинчастих конструкційних елементів, у яких пластини піддано згину, див. розділ 11.

6.2 Опір поздовжнім напруженням

(1) Опір пластинчастих конструкційних елементів можна визначити з застосуванням значень ефективної^p площі підданих стиску пластинчастих елементів, що мають перерізи класу 4, використовуючи характеристики перерізу (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}) для перевіряння перерізу й

розрахунку елементів щодо втрати стійкості за типом роботи стрижня та за поперечно-крутильною формою згідно з EN 1993-1-1.

(2) Значення ефективної^p площі визначають, ґрунтуючись на законі лінійного розподілу деформації, за умов досягнення деформації текучості в серединній площині підданого стику поясу чи в найбільш стиснутому сегменті стінки, залежно від того, яка з умов відповідає найсуворішим вимогам.

6.3 Ефективна площа поперечного перерізу

(1) У розрахунку поздовжніх напружень розглядають комбінацію ефекту запізнення зсуву та втрати стійкості пластини, використовуючи значення ефективної площі, подані у 5.3.2.

(2) Забезпечують властивості ефективного поперечного перерізу елементів, ґрунтуючись на значеннях ефективної площі підданих стиску елементів, а також на значеннях ефективної^s площі елементів, підданих розтягу внаслідок запізнення зсуву.

(3) Ефективну площу A_{eff} визначають за припущення, що поперечний переріз піддано лише напруженням, спричиненим рівномірним осьовим стиском. У разі несиметричних поперечних перерізів можливий зсув e_N центру ваги ефективної площі A_{eff} відносно центру ваги поперечного перерізу брутто, див. рисунок 6.1, спричиняє додатковий момент, який враховують під час перевіряння поперечного перерізу, дотримуючи положень 6.7.

(4) Момент опору ефективного поперечного перерізу W_{eff} визначають за припущення, що в поперечному перерізі виникають лише згинальні напруження, див. рисунок 6.2. У разі двовісного згину моменти опору ефективного поперечного перерізу визначають відносно обох головних осей.

(5) Як альтернативний варіант щодо (3) і (4), окремий ефективний поперечний переріз можна визначити, застосовуючи одночасну дію N_{Ed} та M_{Ed} . Ефекти, спричинені e_N , враховують, як зазначено у (3). Це потребує застосування методу ітерації.

(6) Напруження у поясі розраховують, використовуючи пружний момент опору поперечного перерізу відносно серединної площини поясу.

(7) Для бістлевих балок допустимо, щоб матеріал полиць мав границю текучості f_{yf} в діапазоні від f_{yw} до $2f_{yw}$ за дотримання таких умов (див. рис. 6.3):

а) збільшення напружень на полиці, спричинене податливістю стінки, враховують із дотриманням граничних значень напружень у стінці f_{yw} ;

б) для визначення ефективної площі стінки використовують f_{yf} .

(8) У разі бістелевих балок, які відповідають вимогам 6.3(7), збільшення деформацій та напружень у граничних станах експлуатаційної придатності й втомної міцності допустимо не враховувати.

(9) Для бістелевих балок, які відповідають вимогам 6.3(7), межі зазначеного у EN 1993-1-9 діапазону напружень можна прийняти як $1,5f_{yf}$.

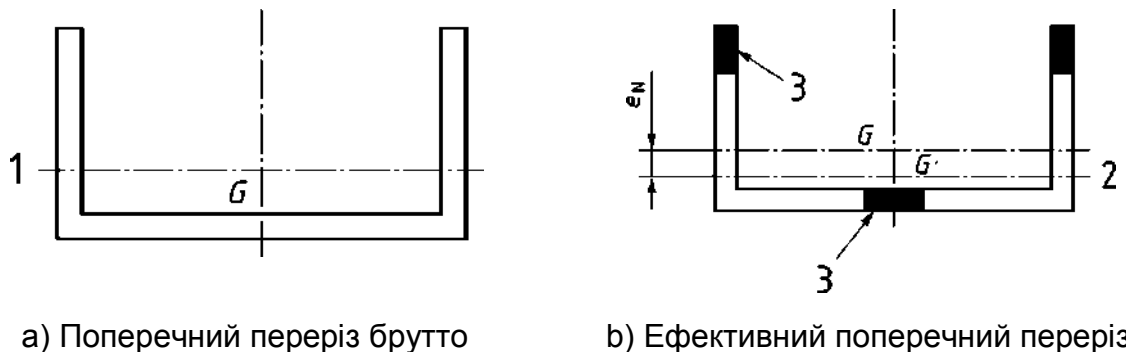


Рисунок 6.1 – Перерізи класу 4: дія осьової сили

Умовні позначки:

G – центр ваги поперечного перерізу брутто;

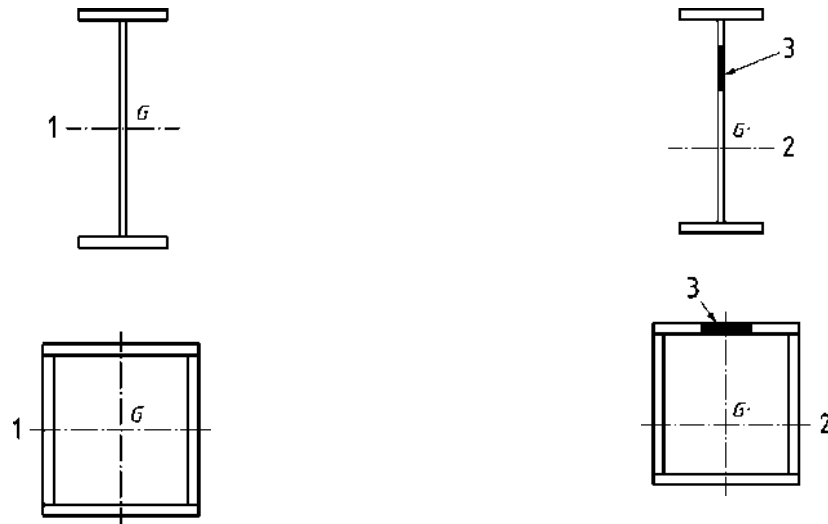
G' – центр ваги ефективного поперечного перерізу;

1 – центроїдальна вісь поперечного перерізу брутто;

2 – центроїдальна вісь ефективного поперечного перерізу;

3 – неефективна ділянка перерізу

Рисунок 6.1 – аркуш 2



а) Поперечний переріз брутто

б) Ефективний поперечний переріз

Умовні позначки:

G – центр ваги поперечного перерізу брутто;

G' – центр ваги ефективного поперечного перерізу;

1 – центроїдальна вісь поперечного перерізу брутто;

2 – центроїдальна вісь ефективного поперечного перерізу;

3 – неефективна ділянка перерізу

Рисунок 6.2 – Перерізи класу 4: дія згинального моменту

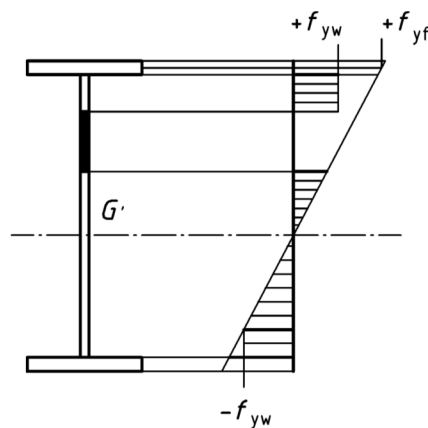


Рисунок 6.3 – Розподіл напружень у бістелевих балках (граничний стан за несною здатністю)

6.4 Пластинчасті елементи без поздовжніх елементів жорсткості

6.4.1 Втрата стійкості за типом роботи пластини

(1) Значення ефективної^p площі підданих стиску елементів зі сталевий штаби визначають, застосовуючи дані з таблиці 6.1 щодо внутрішніх (двобічно обпертих) елементів і з таблиці 6.2 – щодо елементів (однобічно обпертих) зі звисом. Ефективну^p площу зони стиску пластини з площею поперечного перерізу бруто A_c визначають за формулою:

$$A_{c,eff} = \rho A_c, \quad (6.1)$$

де ρ – понижувальний коефіцієнт для врахування втрати стійкості пластини.

(2) Понижувальний коефіцієнт ρ визначають:

– для внутрішніх (двобічно обпертих) елементів, підданих стиску:

$$\rho = \begin{cases} 1,0 & \text{для } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \\ \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{(\bar{\lambda}_p)^2} & \text{для } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \end{cases}, \quad (6.2)$$

– для елементів (однобічно обпертих) зі звисом, підданих стиску:

$$\rho = \begin{cases} 1,0 & \text{для } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \\ \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{(\bar{\lambda}_p)^2} & \text{для } \bar{\lambda}_p > 0,748 \end{cases}; \quad (6.3)$$

де

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}; \quad (6.4)$$

ψ – коефіцієнт відношення напружень, що визначають згідно з 6.4.1(4) та 6.4.1(5);

$\bar{b}$ – застосовна ширина, яку має бути прийнято як h – для кутів, та c – для всіх інших ситуацій згідно з визначеннями в таблиці 7.3 EN 1993-1-1:2022;

k_σ – коефіцієнт втрати стійкості, що відповідає відношенню напружень ψ . У разі довгомірних пластин k_σ можна визначити з таблиць 6.1 чи 6.2 відповідно. Якщо його не визначають із цих таблиць, то коефіцієнт втрати стійкості k_σ розраховують згідно з припущенням шарнірного обпирання чи вільного стану кромки, відповідно, нехтуючи будь-яким защемленням від повертання, утворюваним суміжними пластинами;

t – товщина пластини;

$\sigma_{cr,p}$ – критичне напруження за втрати стійкості у пружній стадії пластини;

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}, \text{ де } f_y \text{ – границя текучості, в Н/мм}^2.$$

(3) Значення $\sigma_{cr,p}$ можна обчислити за формулою (6.5), а також визначити з таблиць 6.1 та 6.2. Стосовно пластин, для яких приймають коефіцієнт напружень ψ , що не дорівнює 1,0, $\sigma_{cr,p}$ визначають як критичне напруження втрати стійкості в пружній стадії пластини біля кромки панелі, де виникає максимальне стискальне напруження.

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \sigma_E, \quad (6.5)$$

де

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} = 190\,000 \left(\frac{t}{\bar{b}} \right)^2, \text{ у Н/мм}^2 \quad (6.6)$$

(4) Для елементів поясу з двотаврових профілів і балок із коробчастого профілю коефіцієнт напружень ψ , використовуваний у таблицях 6.1 і 6.2, може ґрунтуватися на властивостях загальної площі поперечного перерізу з відповідним урахуванням запізнення зсуву в поясах, якщо застосовно. Для елементів стінки використовуваний у таблиці 6.1 коефіцієнт напружень ψ можна визначити із застосуванням розподілу напружень, ґрунтуючись на ефективній площі підданого стиску поясу та площі перерізу бруто стінки.

(5) Якщо розподіл напружень змінюється на різних етапах спорудження конструкції (як, наприклад, у разі сталі-залізобетонного моста), то на різних етапах можна спочатку розрахувати напруження, застосовуючи поперечний переріз, складений з ефективних площ поясів, і переріз бруто стінки, а далі скласти разом ці напруження. Потім, ґрунтуючись на отриманому розподілі цих напружень, можна визначити ефективний переріз стінки й використовувати його на всіх етапах, завдяки чому визначити остаточний розподіл напружень і виконати їх розрахунок.

(6) За винятком зазначених у (9) ситуацій, гнучкість пластини $\bar{\lambda}_p$ елемента можна замінити на:

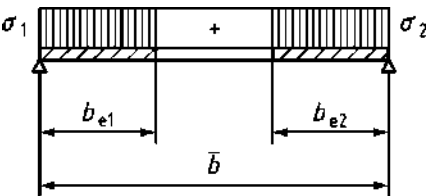
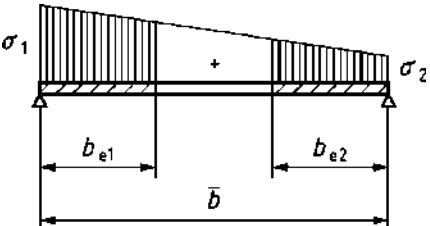
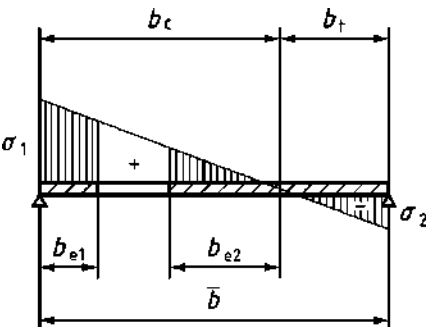
$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}}, \quad (6.7)$$

де

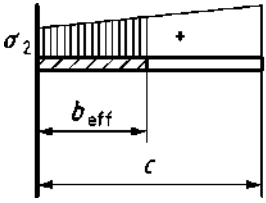
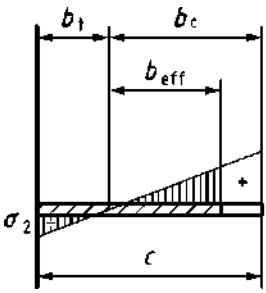
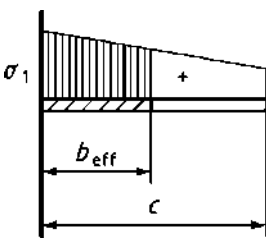
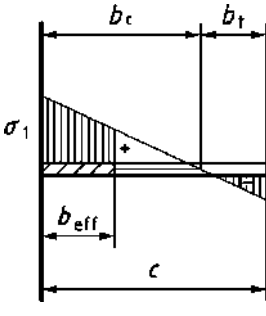
$\sigma_{com,Ed}$ — максимальне розрахункове стискальне напруження в елементі, визначене з застосуванням ефективної^p площі перерізу, обумовлене всіма одночасними діями.

Примітка. Описана вище методика відображає консервативний підхід і потребує ітераційного розрахунку, у якому коефіцієнт відношення напружень ψ (див. таблиці 6.1 та таблицю 6.2) визначають на кожному етапі (кроці) обчислення напружень, розрахованих із застосуванням ефективного^p поперечного перерізу, визначеного наприкінці попереднього етапу (кроку) обчислення.

Таблиця 6.1 – Двобічно оберті елементи, піддані стиску

Розподіл напруження (значення за стиску з додатним знаком)				Ефективна ^p ширина b_{eff}			
				$\psi = 1:$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}}$			
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$			
				$\psi < 0:$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1-\psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$	$\psi < -3$
Коефіцієнт втрати стійкості k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$	95,68

Таблиця 6.2 – Однобічно оберті елементи, піддані стиску

Розподіл напруження (значення за стиску з додатним знаком)			Ефективна ^p ширина b_{eff}		
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$		
			$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	$\psi < -3$
Коефіцієнт втрати стійкості k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	1,83
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$		
			$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	$\psi \leq -1$
Коефіцієнт втрати стійкості k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

(7) Якщо гнучкість пластини розраховують відповідно до (6), то подані нижче формули можна застосувати для обчислення значень ефективної площі за рівнів напруження, менших за границю текучості:

а) двобічно обпертих елементів, підданих стиску:

$$\rho = 1,0 \text{ за умови } \bar{\lambda}_p < 0,673; \quad (6.8)$$

$$\rho = \frac{1 - 0,055(3 + \psi)/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0,6}, \text{ але } \rho \leq 1 \text{ за умови } \bar{\lambda}_p \geq 0,673; \quad (6.9)$$

б) однобічно обпертих елементів, підданих стиску:

$$\rho = 1,0 \text{ за умови } \bar{\lambda}_p < 0,748; \quad (6.10)$$

$$\rho = \frac{1 - 0,188/\bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0,18 \frac{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_p - 0,6}, \text{ але } \rho \leq 1 \text{ за умови } \bar{\lambda}_p \geq 0,748; \quad (6.11)$$

Щодо познач див. 6.4.1(2) та 6.4.1(6). Для розрахунку опору загальній втраті стійкості застосовують 6.4.1(9). Якщо значення $\sigma_{com,Ed}/(f_y/\gamma_{M0})$ або $\sigma_{com,Ed}/f_y$ менше 0,11, то у формулі з визначення $\bar{\lambda}_{p,red}$ застосовують значення 0,11.

(8) У разі однобічно обпертих елементів для розрахунку ефективної площі $A_{c,eff}$ можна використовувати альтернативний метод, поданий у додатку С EN 1993-1-3:2024.

(9) Для перевіряння розрахункового опору втраті стійкості елемента (із перерізом) класу 4, застосовуючи положення 8.3.1, 8.3.2 або 8.3.4 EN 1993-1-1:2022, використовують гнучкість пластини $\bar{\lambda}_p$ або $\bar{\lambda}_{p,red}$, а також $\sigma_{com,Ed}$, визначене розрахунком згідно з теорією другого порядку з урахуванням загальних (геометричних) недосконалостей.

(10) У разі підданих стиску непідкріплених двобічно обпертих елементів в умовах граничного стану, в яких не можливо виникнення мембрани чи затиску з защемленням від переміщень, формулу (6.2) замінюють на формулу (12.9), де приймають $\alpha_p = 0,34$ та $\bar{\lambda}_{p0} = 0,70$.

Примітка. Зазвичай це стосується непідкріплених порожнистих профілів із квадратним перерізом, підданих лише стиску, або ситуацій, у яких розглядувану пластину не з'єднано з суміжними пластинами за допомогою зварного шва з повним проплавленням чи за допомогою двосторонніх кутових зварних швів. У

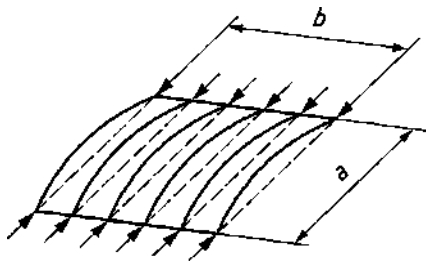
Національному додатку може бути визначено інші ситуації, умови яких виключають виникнення затиску з защемленням від переміщень.

6.4.2 Втрата стійкості за типом роботи стрижня

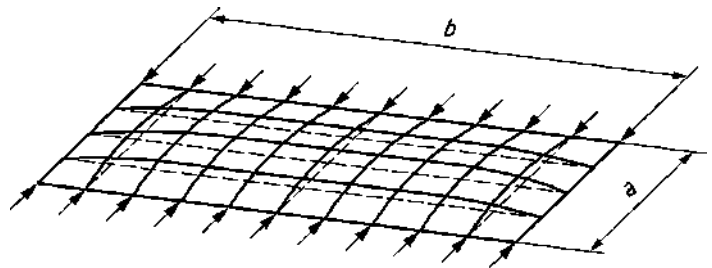
(1) Критичне напруження $\sigma_{cr,c}$ за втрати стійкості пластини в пружній стадії визначають як напруження за втрати стійкості у стані відсутнього обпирання кромek у поздовжньому напрямку.

(2) У разі співвідношення розмірів сторін $a/b < 1$ може виникати втрата стійкості за типом роботи стрижня, тому перевіряння виконують відповідно до 6.6 із застосуванням понижувального коефіцієнта ρ_c .

Примітка. Це стосується, наприклад, елементів зі сталевих штаб, розташованих між поперечними елементами жорсткості, де пластина може втратити стійкість подібно до стрижня, відтак у цій ситуації потрібно застосовувати понижувальний коефіцієнт ρ_c , наближений до χ_c , як у разі втрати стійкості стрижня, див. рисунок 6.4 а) та б).



а) втрата стійкості пластини за типом роботи стрижня за відсутніх опорних елементів для кромek у поздовжньому напрямку



б) втрата стійкості невідкріпленої пластини за типом роботи стрижня у разі малого значення співвідношення розмірів сторін a/b

Рисунок 6.4 – Втрата стійкості за типом роботи стрижня

(3) У разі невідкріпленої пластини критичне напруження $\sigma_{cr,c}$ втрати стійкості за типом роботи стрижня в пружній стадії можна обчислити за формулою:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) a^2} \quad (6.12)$$

(4) Умовну гнучкість стрижня $\bar{\lambda}_c$ для непідкріплених пластин визначають за такою формулою:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (6.13)$$

(5) Якщо на різних кінцях розглядуваної панелі відбувається різний розподіл напружень, то довжину панелі a у формулі (6.12) замінюють на модифіковане значення довжини за втрати стійкості, a_{cr} . Модифіковану довжину за втрати стійкості визначають так:

$$a_{cr} = a \sqrt{\frac{1 + 0,88 \frac{N_1}{N_2}}{1,88}} \text{ за умови } \frac{N_1}{N_2} \leq 1,0, \quad (6.14)$$

де N_1 та N_2 – рівнодійні осьові зусилля, спричинені напруженнями на відповідних кінцях панелі.

(6) Понижувальний коефіцієнт χ_c , призначений для використання згідно з 6.6.1, визначають згідно з 8.3.1.3 EN 1993-1-1:2022. Для непідкріплених пластин застосовують значення $\alpha = 0,21$, що відповідає кривій втрати стійкості a .

6.5 Пластинчасті елементи, підкріплені поздовжніми елементами жорсткості

6.5.1 Загальні положення

(1) У разі пластин із поздовжніми елементами жорсткості враховують ефективні^p площі за місцевої втрати стійкості різних субпанелей між елементами жорсткості, а також ефективні^p площі за загальної втрати стійкості підкріпленої панелі.

(2) Ефективну^p площу перерізу кожної субпанелі визначають, застосовуючи понижувальний коефіцієнт згідно з 6.4 для врахування місцевої втрати стійкості пластини. Виконують перевіряння підкріпленої пластини разом з ефективними^p площами перерізу елементів жорсткості щодо загальної втрати стійкості (моделюванням

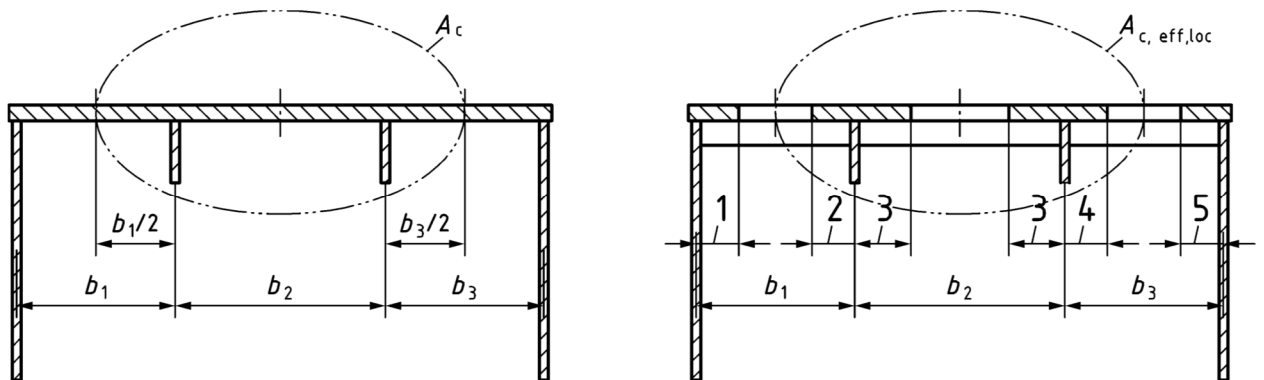
її як еквівалентної ортотропної пластини), а понижувальний коефіцієнт ρ_c для врахування загальної втрати стійкості пластини визначають, розглядаючи її роботу під час втрати стійкості за типом пластини та за типом стрижня.

(3) Ефективну^p площу зони стиску підкріпленої пластини визначають так:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t, \quad (6.15)$$

де $A_{c,eff,loc}$ – ефективна^p площа перерізу всіх елементів жорсткості та субпанелей, які повністю або частково перебувають у зоні стиску, за винятком ефективних крайових частин, опертих на суміжні пластинчасті елементи.

Примітка. Див. приклади на рисунку 6.5 ($b_{1,edge,eff}$ та $b_{3,edge,eff}$) та на рисунку 6.9 ($b_{1,sup}$).



Умовні позначки:

$$1 - b_{1,edge,eff} = \rho_1 \frac{b_1}{2};$$

$$2 - \rho_1 \frac{b_1}{2};$$

$$3 - \rho_2 \frac{b_2}{2};$$

$$4 - \rho_3 \frac{b_3}{2};$$

$$5 - b_{3,edge,eff} = \rho_3 \frac{b_3}{2}$$

Рисунок 6.5 – Підкріплена пластина, піддана рівномірному стиску

(4) Площу $A_{c,eff,loc}$ обчислюють за формулою:

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t, \quad (6.16)$$

де

$\sum_c$ – стосується частини ширини підкріпленої панелі, яку піддано стиску, за винятком частин $b_{edge,eff}$ (див. рис. 6.5);

$A_{sl,eff}$ – сума значень ефективної^p площі перерізів згідно з 6.4 усіх розташованих у зоні стиску поздовжніх елементів жорсткості із загальною площею A_{sl} ;

$b_{c,loc}$ – ширина підданої стиску частини кожної субпанелі;

ρ_{loc} – понижувальний коефіцієнт згідно з 6.4.1(2) для кожної субпанелі.

(5) Підкріплені пластини зі слабкими поздовжніми елементами жорсткості розглядають як непідкріплені пластини відносно їхнього опору поздовжнім напруженням, а їхню ефективну^p площу обчислюють згідно з 6.4. Поздовжні елементи жорсткості вважають слабкими, якщо відносна згинальна жорсткість $\gamma_{sl,i}^*$ кожного елемента жорсткості становить менше 25, де $\gamma_{sl,i}^*$ визначають за формулою:

$$\gamma_{sl,i}^* = \frac{EI_{sl,i}^*}{bD}, \quad (6.17)$$

де

E – модуль Юнга;

b – загальна ширина підкріпленої пластини;

D – згинальна жорсткість пластини, яку визначають так:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)};$$

t – товщина пластини;

ν – коефіцієнт Пуассона;

$I_{s\ell,i}^*$ – момент інерції площі елемента жорсткості за згину з площини, поперечний переріз якого охоплює задіяну ширину пластини $10t$ з кожного боку кожного стику елемента жорсткості з пластиною.

(6) Зменшення підданої стиску площі $A_{c,eff,loc}$ застосуванням коефіцієнта ρ_c допустимо вважати постійним зменшенням по всьому поперечному перерізу.

(7) Якщо запізнення зсуву є значущим чинником (див. 5.3), то для визначення ефективної площі поперечного перерізу A_{eff} зони стиску підкріпленої пластини враховують не лише ефекти місцевої втрати стійкості пластини, але й ефекти запізнення зсуву.

(8) Ефективну площу поперечного перерізу в зоні розтягу підкріпленої пластини приймають як загальну площу перерізу бруто зони розтягу, зменшену з урахуванням запізнення зсуву, якщо застосовно, див. 5.3.

(9) Момент опору ефективного перерізу W_{eff} визначають як момент інерції площі ефективного поперечного перерізу, що ділять на відстань від його центру ваги до середини висоти перерізу розглядуваної пластини.

6.5.2 Втрата стійкості за типом роботи пластини

(1) Умовну гнучкість $\bar{\lambda}_p$ еквівалентної пластини визначають за формулою:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{k_{\sigma,p} \sigma_E}}, \quad (6.18)$$

у якій $\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c}$;

де

A_c – площа перерізу бруто в зоні стиску підкріпленої пластини без урахування частин субпанелей, підтримуваних суміжною

пластиною, див. рисунок 6.5 (помножена на коефіцієнт запізнення зсуву, якщо враховують запізнення зсуву, див. 5.3);

$A_{c,eff,loc}$ – ефективна площа перерізу тієї самої частини пластини (з урахуванням ефекту запізнення зсуву, якщо застосовно), із відповідним урахуванням можливої втрати стійкості субпанелей та/або елементів жорсткості за типом роботи пластини;

$\sigma_{cr,p}$ – дорівнює значенню критичного напруження за втрати стійкості пластини в пружній стадії;

$k_{\sigma,p}$ – коефіцієнт для врахування втрати стійкості підкріпленої пластини, визначений згідно з формулами (6.5) та (6.6), у яких $\bar{b}$ приймають як таке, що дорівнює b , зазначеному на рисунку 6.9.

Примітка. Щодо розрахунку $\sigma_{cr,p}$ або $k_{\sigma,p}$ див. додаток А.

(2) Понижувальний коефіцієнт ρ для еквівалентної ортотропної пластини визначають згідно з 6.4.1(2) із застосуванням $\bar{\lambda}_p$, обчисленого за формулою (6.18), та з дотриманням для елементів жорсткості з замкненим перерізом такої умови: або співвідношення розмірів їхніх сторін a/b становить менше 2,0, або крутильну жорсткість елементів жорсткості не враховують в обчисленні $\sigma_{cr,p}$.

(3) Якщо в обчисленні $\sigma_{cr,p}$ ураховують крутильну жорсткість елементів жорсткості з замкненим перерізом, а співвідношення розмірів їхніх сторін a/b більше чи дорівнює 2,0, то понижувальний коефіцієнт ρ для еквівалентної ортотропної пластини визначають за формулою (12.9), у якій $\alpha_p = 0,34$, а $\bar{\lambda}_{p0} = 0,7$.

6.5.3 Втрата стійкості за типом роботи стрижня

(1) Втрата стійкості за типом роботи стрижня відбувається у ситуації, у якій граничні умови вздовж поздовжніх кромek не впливають на роботу за втрати стійкості, як, наприклад, показано на рисунку 6.6.

Цей ефект може виникати як у разі коротких, так і в разі довгих (довгомірних) пластин.

(2) Критичне напруження $\sigma_{cr,c}$ за втрати стійкості в пружній стадії підкріпленої пластини визначають як напруження втрати стійкості за відсутніх опорних елементів уздовж поздовжніх кромки.

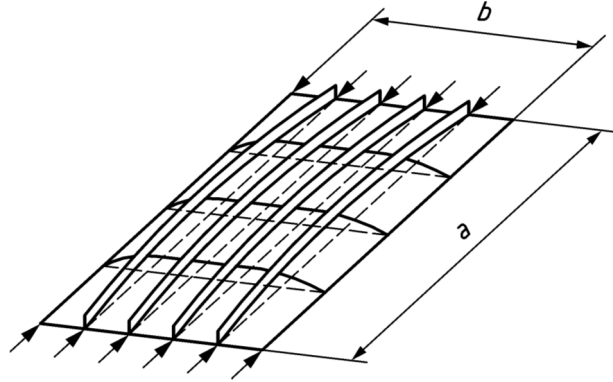


Рисунок 6.6 – Втрата стійкості підкріпленої в поздовжньому напрямку пластини за типом роботи стрижня

(3) У разі підкріпленої пластини з ідентичними елементами жорсткості $\sigma_{cr,c}$ можна визначити, застосовуючи пружне критичне напруження $\sigma_{cr,s\ell}$ втрати стійкості за типом роботи стрижня, що стосується найближчого до кромки панелі елемента жорсткості з найвищим напруженням стиску, використовуючи таку формулу:

$$\sigma_{cr,s\ell} = \frac{\pi^2 E I_{s\ell,1}}{A_{s\ell,1} a^2}, \quad (6.19)$$

де

$I_{s\ell,1}$ – момент інерції площі поперечного перерізу бруто елемента жорсткості та суміжних частин пластини, що стосується згину із площини пластини;

$A_{s\ell,1}$ – площа поперечного перерізу бруто елемента жорсткості та суміжних частин пластини згідно з рисунком 6.9.

Значення $\sigma_{cr,c}$ можна прийняти як $\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,s\ell} b_c / b_{s\ell,1}$, де $\sigma_{cr,c}$ стосується підданої стиску кромки пластини, а $b_{s\ell,1}$ та b_c – геометричні

значення розподілу напружень, використовувані для екстраполяції, див. рисунок 6.9.

У конфігураціях із неідентичними елементами жорсткості, розподіленими по панелі, цю методику застосовують до всіх елементів жорсткості.

(4) Умовну гнучкість стрижня $\bar{\lambda}_c$ визначають так:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}}, \quad (6.20)$$

$$\text{де } \beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}};$$

$A_{sl,1}$ – визначають згідно з 6.5.3(3);

$A_{sl,1,eff}$ – ефективна площа поперечного перерізу елемента жорсткості та суміжних частин пластини з відповідним урахуванням втрати стійкості пластини, див. рисунок 6.9.

(5) Понижувальний коефіцієнт χ_c визначають згідно з 8.3.1.3 EN 1993-1-1:2022. У разі підкріплених пластин величину α відповідно збільшують до такого значення:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e}, \quad (6.21)$$

де

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}};$$

$e = \max \{e_1, e_2\}$ – найбільше зі значень відстаней, зазначених на рисунку 6.7:

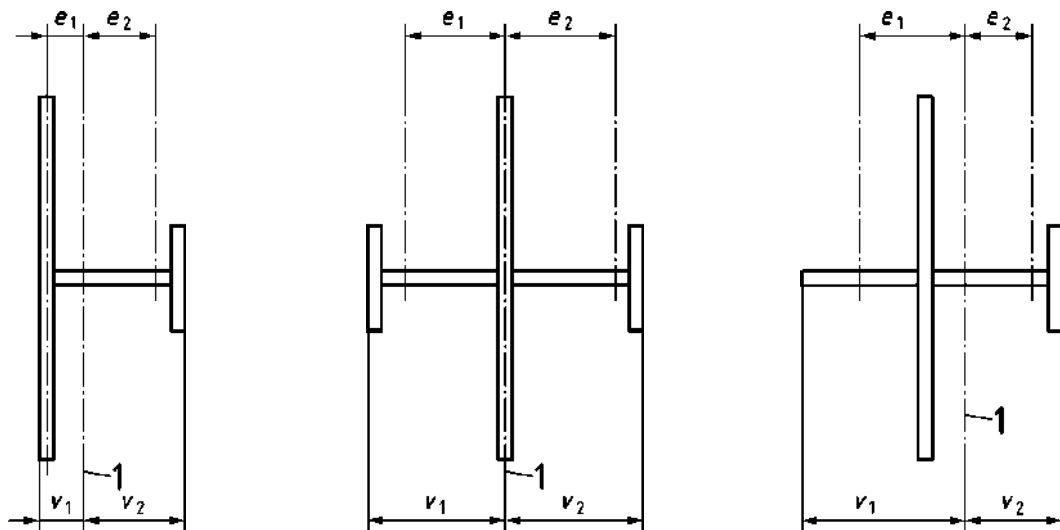
а) від відповідних центрів ваги пластини (e_1) та розташованого з одного боку елемента жорсткості (e_2) до нейтральної осі ефективного (умовного) стрижня;

б) від відповідних центрів ваги одиничних (окремих) елементів жорсткості ($e_1 = e_2$) до нейтральної осі ефективного (умовного) стрижня;

с) від відповідних центрів ваги одиничних (окремих) елементів жорсткості (e_1 відповідне до e_2) до нейтральної ефективного (умовного) стрижня;

$\alpha = 0,34$ (крива b) у разі елементів жорсткості з замкненим перерізом;

$\alpha = 0,49$ (крива c) у разі елементів жорсткості з незамкненим перерізом.



а) елемент жорсткості,
встановлений з одного
боку

б) елементи жорсткості,
симетрично встановлені
з двох боків

с) елементи жорсткості,
несиметрично встановлені
з двох боків

Умовні позначки:

1 – нейтральна вісь ефективного (умовного) стрижня;

$e = \max \{e_1; e_2\}$ – у разі симетрично встановлених елементів жорсткості (варіант b), $e = e_1 = e_2$

Рисунок 6.7 – Інтерпретація значень e_1 та e_2

6.6 Інтерполяція між характеристиками втрати стійкості за типом роботи пластини і типом роботи стрижня

6.6.1 Загальні положення

(1) Інтерполяцію проводять між понижувальним коефіцієнтом ρ , застосовним для врахування втрати стійкості за типом роботи

пластини, та понижувальним коефіцієнтом χ_c , застосовним для врахування втрати стійкості за типом роботи стрижня, щоб визначити остаточний понижувальний коефіцієнт ρ_c згідно з формулою (6.22). Інтерполяцію виконують окремо для підкріплених і непідкріплених пластин, якщо застосовно. Ілюстрацію до формули інтерполяції подано на рисунку 6.8.

$$\rho_c = \chi_c + f(\rho - \chi_c); \quad (6.22)$$

$$f = V \cdot (\ln(\xi + 1))^P, \text{ але } 0 \leq f \leq 1; \quad (6.23)$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1, \quad \text{але } \xi \geq 1, \quad (6.24)$$

де

χ_c – понижувальний коефіцієнт для врахування втрати стійкості за типом роботи стрижня згідно з 6.4.2(6) та 6.5.3(5), відповідно, для непідкріплених і підкріплених пластин;

ρ – понижувальний коефіцієнт для врахування втрати стійкості за типом роботи пластини згідно з 6.4.1 та 6.5.2(2), відповідно, для непідкріплених і підкріплених пластин.

f – функція інтерполяції для визначення типу роботи пластини й типу роботи стрижня, задана із застосуванням формули (6.23);

ξ – ваговий коефіцієнт відповідного типу роботи пластини й типу роботи стрижня, визначений за формулою (6.24);

V, P – параметри для врахування взаємозв'язку роботи за типом пластини й за типом стрижня, визначені з таблиць 6.3 чи 6.4;

$\sigma_{cr,p}$ – критичне напруження за втрати стійкості в пружній стадії пластини;

$\sigma_{cr,c}$ – критичне напруження за втрати стійкості в пружній стадії стрижня згідно з 6.4.2(3) та 6.5.3(3), відповідно, для непідкріплених і підкріплених пластин.

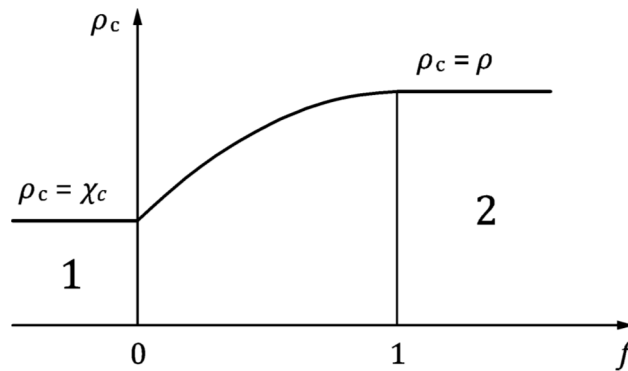


Рисунок 6.8 – Інтерполяція між характеристиками втрати стійкості за типом роботи пластини (2) та типом роботи стрижня (1)

(2) У разі непідкріплених панелей чи для перевіряння щодо місцевої втрати стійкості параметри V та P визначають згідно з таблицею 6.3 залежно від напрямку навантаження та методу, застосовного для розрахунку критичного напруження за втрати стійкості.

(3) У разі підкріплених панелей чи для перевіряння щодо загальної втрати стійкості параметри V та P визначають згідно з таблицею 6.4, залежно від методу, застосовного для розрахунку значень критичного напруження за втрати стійкості, від вагового коефіцієнта ξ і типу елементів жорсткості.

У таблицях 6.3 та 6.4:

σ_x означає напруження в площині, що діють у напрямку паралельно поздовжньому навантаженню;

σ_z означає напруження в площині, що діють у напрямку перпендикулярно поздовжньому навантаженню.

Таблиця 6.3 – Визначення параметрів V та P у разі непідкріплених панелей чи для перевіряння щодо місцевої втрати стійкості

Напруження	α_{cr} , $\sigma_{cr,p}$ чи ξ , які визначають	V	P
σ_x та/або σ_z	застосовуючи k_σ згідно з таблицями 6.1 та 6.2	1,5	0,8
σ_x	як точне значення, розраховане, наприклад, числовими методами	1	0,5
σ_z	як точне значення, розраховане, наприклад, числовими методами	1	1,5

Таблиця 6.4 – Визначення параметрів V та P у разі підкріплених панелей чи для перевіряння щодо загальної втрати стійкості

Напруження	Елементи жорсткості	α_{cr} , $\sigma_{cr,p}$ чи ξ , які визначають	V	P
σ_x	всіх типів	застосовуючи k_σ та $\sigma_{cr,p}$ згідно з додатком А або ξ згідно з 6.6.2	1,5	0,8
σ_x та/або σ_z	із незамкненим перерізом	як точне значення, розраховане, наприклад, числовими методами	1	0,5
σ_x та/або σ_z	із замкненим перерізом	як точне значення, розраховане, наприклад, числовими методами	$(\bar{\lambda}_p + 1)^{-2/3}$	1

6.6.2 Альтернативні методи оцінювання вагового коефіцієнта ξ

(1) Як альтернативний варіант, у разі пластин із поздовжніми елементами жорсткості ваговий коефіцієнт ξ можна визначити безпосередньо за однією з формул, поданих у (2) та (3).

(2) Для еквівалентних ортотропних пластин із щонайменше трьома ідентичними елементами жорсткості ваговий коефіцієнт ξ можна обчислити за формулами:

$$\xi = k_{\sigma,p} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{b_{s\ell,1}}{b_c} \frac{1 + \delta}{\gamma} - 1 \quad \text{за умови } \psi \neq 1 \quad (6.25)$$

та

$$\xi = \frac{\left(1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right)^2 - 1}{\gamma} \quad \text{за умови } \psi = 1; 0,5 \leq \frac{a}{b} \leq \sqrt[4]{\gamma}, \text{ але } \xi \geq 0, \quad (6.26)$$

де

$$\gamma = \frac{I_{s\ell}}{I_p};$$

$$\delta = \frac{A_{s\ell}}{A_p},$$

а також

$I_{s\ell}$ – момент інерції площі всієї підкріпленої пластини;

I_p – момент інерції площі за згину пластини, що визначають за формулою:

$$I_p = \frac{bt^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{bt^3}{10,92};$$

$A_{s\ell}$ – сума значень площі перерізів бруто окремих поздовжніх елементів жорсткості;

A_p – площа перерізу бруто пластини (дорівнює $b t$);

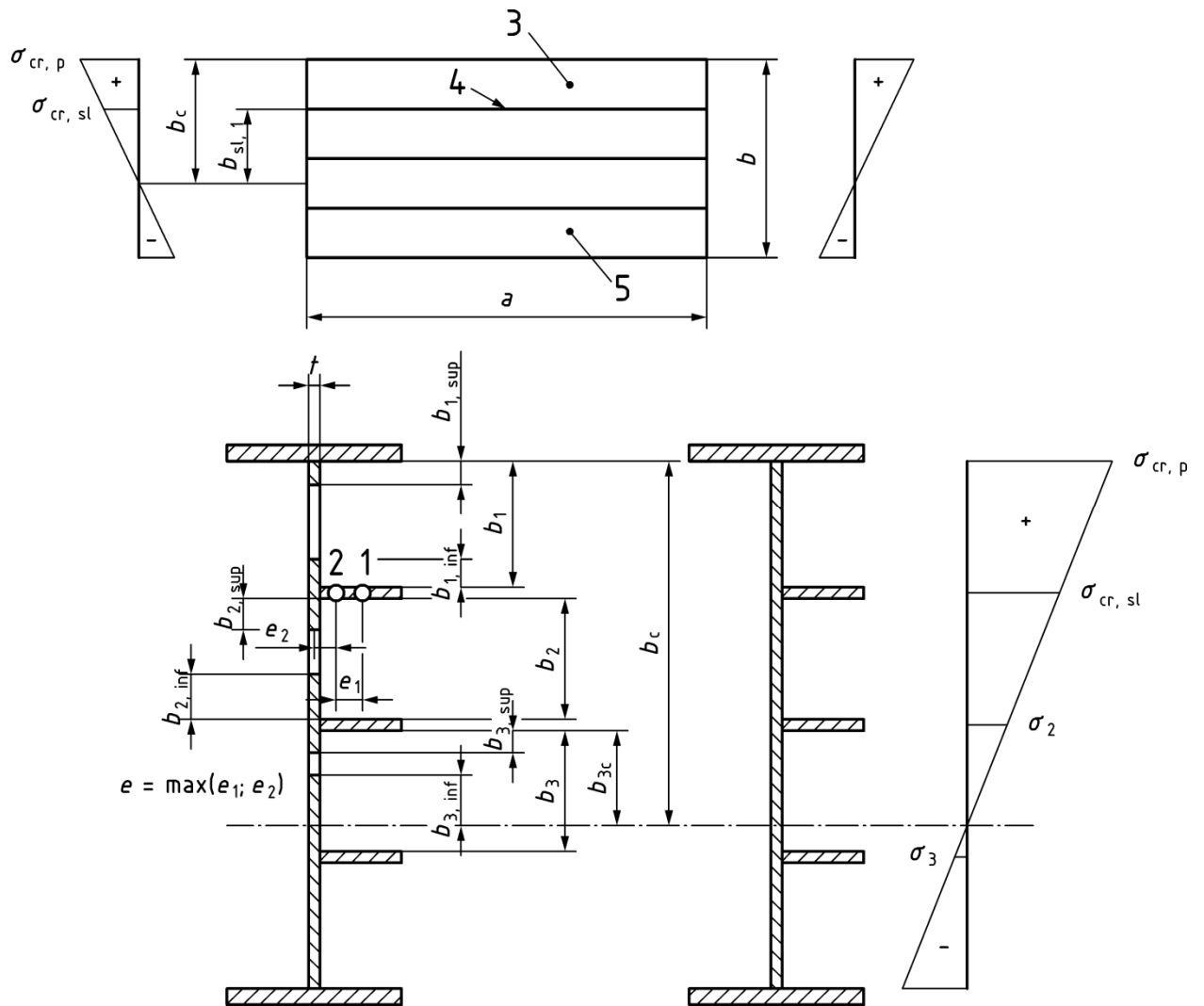
σ_1 – більше значення граничного напруження (із додатним знаком за стиску);

σ_2 – менше значення граничного напруження (із додатним знаком за стиску);

ψ – дорівнює σ_2/σ_1 ;

$a, b, b_c, b_{s\ell,1}$ та t – зазначено на рисунку 6.9 та в таблиці 6.5;

$k_{\sigma,p}$ – визначено в 6.5.2.



Умовні позначки:

- 1 – центр ваги елемента жорсткості;
- 2 – центр ваги стрижня, що охоплює елементи жорсткості плюс суміжні листи (стілки балки);
- 3 – субпанель;
- 4 – елемент жорсткості;
- 5 – товщина пластини t

Рисунок 6.9 – Позначення для пластин із поздовжніми елементами жорсткості

Таблиця 6.5 – Визначення ширини згідно з рисунком 6.9

	Ширина у разі площі перерізу брутто	Ширина у разі ефективної площі згідно з таблицею 6.1	Умова для ψ_i
$b_{1,\text{inf}}$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_1$	$\frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} b_{1,\text{eff}}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{\text{cr},s\ell,1}}{\sigma_{\text{cr},p}} > 0$
$b_{2,\text{sup}}$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_2$	$\frac{2}{5 - \psi_2} b_{2,\text{eff}}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{cr},s\ell,1}} > 0$
$b_{2,\text{inf}}$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_2$	$\frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} b_{2,\text{eff}}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,\text{sup}}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,\text{eff}}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

(3) Для ортотропних пластин з одним чи двома елементами жорсткості ваговий коефіцієнт ξ можна обчислити за формулою:

$$\xi = k_{\sigma,p} \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{b_{s\ell,1}}{b_c} \frac{A_{s\ell,1} t^2}{12(1 - \nu^2) I_{s\ell,1}} - 1 \quad (6.27)$$

Якщо $a \leq a_c$, то формулу (6.27) замінюють на формулу (6.28).

$$\xi = \frac{a^4 b t^3}{4\pi^2 (1 - \nu^2) b_1^2 b_2^2 I_{s\ell,1}}, \quad (6.28)$$

де

$$a_c = 4,33 \left(\frac{b_1^2 b_2^2 I_{s\ell,1}}{b t^3} \right)^{0,25};$$

a , b , b_c , $b_{s\ell,1}$ та t – зазначено на рисунку 6.9;

b_1 , b_2 – відстані від поздовжніх крамок стінки до елемента жорсткості ($b_1 + b_2 = B$);

$A_{s\ell,1}$ – площа перерізу брутто стрижня, визначена згідно з (4) і (5);

$I_{s\ell,1}$ – момент інерції площі поперечного перерізу брутто стрижня, визначеної згідно з (4) та (5) відносно осі, що проходить через її центр ваги й паралельно площині пластини;

$k_{\sigma,p}$ – визначено в 6.5.2.

(4) Для розрахунку $A_{s\ell,1}$ та $I_{s\ell,1}$ поперечний переріз бруто стрижня визначають як площу перерізу бруто елемента жорсткості та прилеглих частин пластини, як показано на рисунку 6.9.

(5) Якщо підкріплена пластина має два поздовжні елементи жорсткості в зоні стиску, то розрахунок ξ виконують щодо трьох варіантів ситуацій, поданих на рисунку 6.10, враховуючи, по-перше, що коли один з елементів жорсткості піддано втраті стійкості, то інший працює як жорстка опора. Втрату стійкості обох елементів жорсткості одночасно враховують, розглядаючи умовний об'єднаний елемент жорсткості, що замінюють на два окремі з таким розрахунком, щоб:

а) його значення площі поперечного перерізу та значення моменту інерції його площі $I_{s\ell}$ становили відповідно суму значень окремих елементів жорсткості;

б) його місце розташування відповідає рівнодійно спрямованому зусиллю, спричиненому відповідними зусиллями в окремих елементах жорсткості.

Для кожної з трьох ситуацій, проілюстрованих на рисунку 6.10, відповідні значення b_1 , b_2 та B , щоб застосувати у формулі (6.28), зазначають як b_1^* , b_2^* та B^* .

Отримане найнижче значення ξ надалі використовують у формулі (6.24).

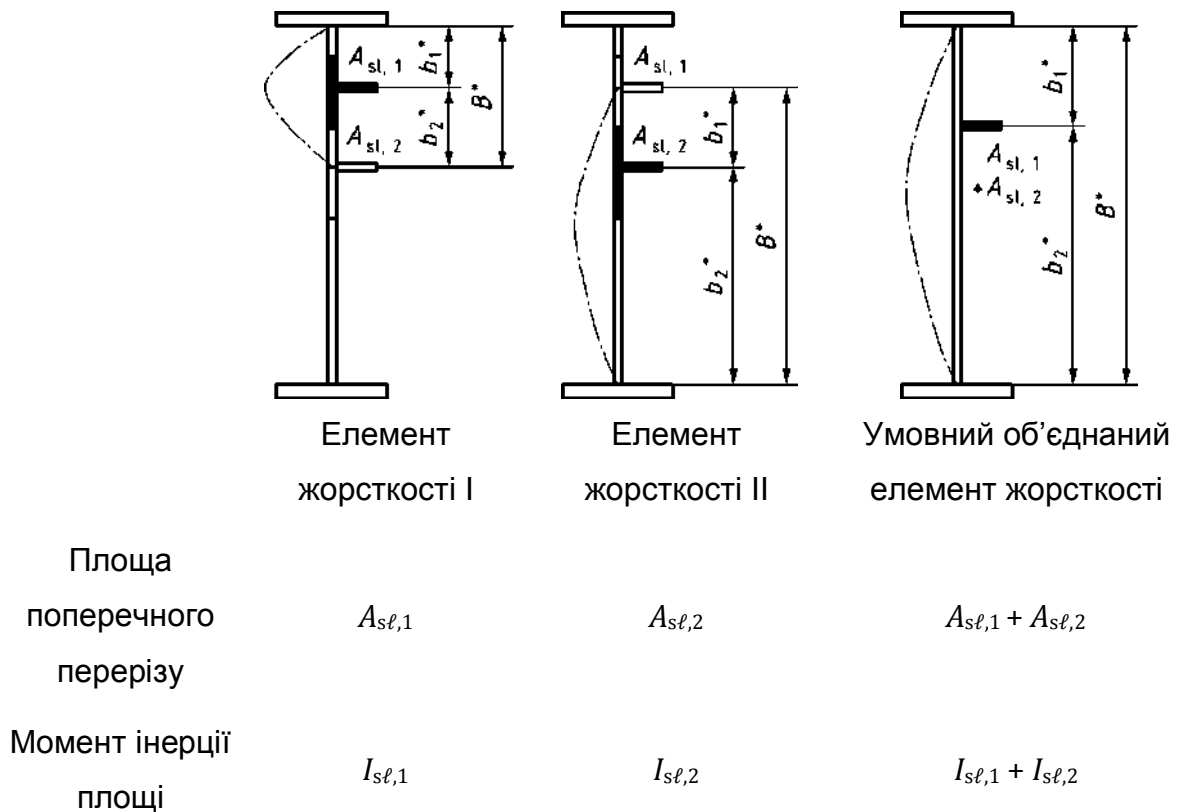


Рисунок 6.10 – Позначення для пластини з двома елементами жорсткості в зоні стиску

6.6.3 Альтернативний спрощений метод для підданих згину панелей, підкріплених поздовжніми елементами жорсткості

(1) Якщо можливо запобігти втраті стійкості стрижня, дотримуючи критерію (2) щодо елемента жорсткості, розташованого найближче до кромки панелі з найбільшим стискальним напруженням, то понижувальний коефіцієнт загальної втрати стійкості пластини можна загалом не враховувати ($\rho_c = 1$).

Це правило застосовують, якщо відносна згинальна жорсткість поздовжніх елементів жорсткості становить щонайменше 25, див. 6.5.1(5), а всі елементи жорсткості мають однакові розміри.

(2) Перевіряння найбільше підданого стиску елемента жорсткості щодо втрати стійкості за типом роботи стрижня можна виконати, як зазначено нижче:

$$\sigma_{sl,1} \leq \frac{\chi_c f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (6.29)$$

де $\sigma_{sl,1}$ – середнє напруження в розглядуваному поздовжньому елементі жорсткості, обчислене з застосуванням його ефективної площі поперечного перерізу $A_{sl,1,eff}$, як визначено в 6.5.3(4). Розподіл напружень по всій підкріпленій панелі визначають із пружного загального розрахунку з використанням ефективного поперечного перерізу панелі $A_{c,eff,loc}$ (включно з ефектом запізнення зсуву й розрахунку за теорією другого порядку, якщо застосовно), згідно з припущенням, що на кромці панелі з найвищим стискальним напруженням буде досягнуто границі текучості f_y (див. рис. 6.12).

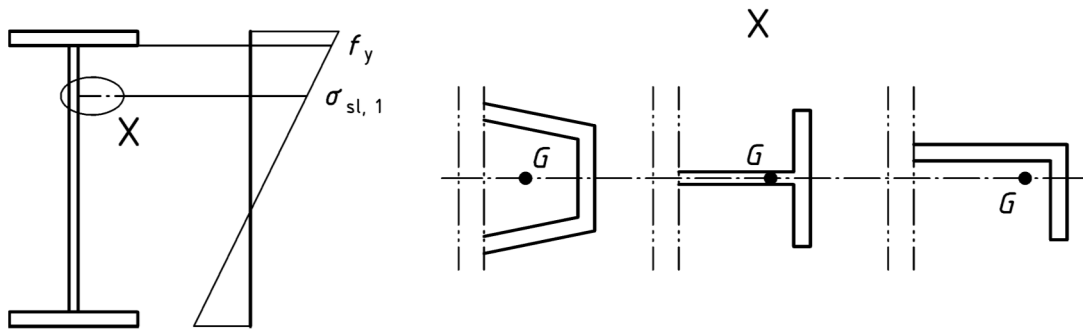


Рисунок 6.11 – Приклади розташування центру ваги G одного елемента жорсткості

Примітка 1. Для спрощення, середнє розрахункове напруження $\sigma_{sl,1}$, яке можна вважати постійним за площею поперечного перерізу $A_{sl,1,eff}$, дорівнюватиме розрахунковому значенню напруження лише на рівні центру ваги G елемента жорсткості, див. рис. 6.11.

Примітка 2. За наявності лише стиску формула (6.29) у жодному разі не може бути дійсною. Відтак, у цій ситуації альтернативний спрощений метод згідно з 6.6.3 не може бути застосовним.

(3) Значення χ_c обчислюють згідно з 6.5.3(5) з урахуванням коефіцієнта недосконалості α_e , а умовну гнучкість стрижня $\bar{\lambda}_{sl,1}$ обчислюють так:

$$\bar{\lambda}_{sl,1} = \sqrt{\frac{A_{sl,1,eff} f_y}{A_{sl,1} \sigma_{cr,sl}}}, \quad (6.30)$$

де

$A_{sl,1}$ та $A_{sl,1,eff}$ – визначають згідно з 6.5.3(4);

$\sigma_{cr,sl}$ – визначають згідно з формулою (6.19).

Примітка. Ефектом защемлення пластини нехтують згідно з припущенням, що умовний стрижень може вільно втрачати стійкість із площини підкріпленої пластини.

(4) Якщо зазначеного в (2) критерію не дотримують, то для обчислення $A_{c,eff}$ відповідно до 6.5.1(3) враховують понижувальний коефіцієнт ρ_c для врахування загальної втрати стійкості пластини.

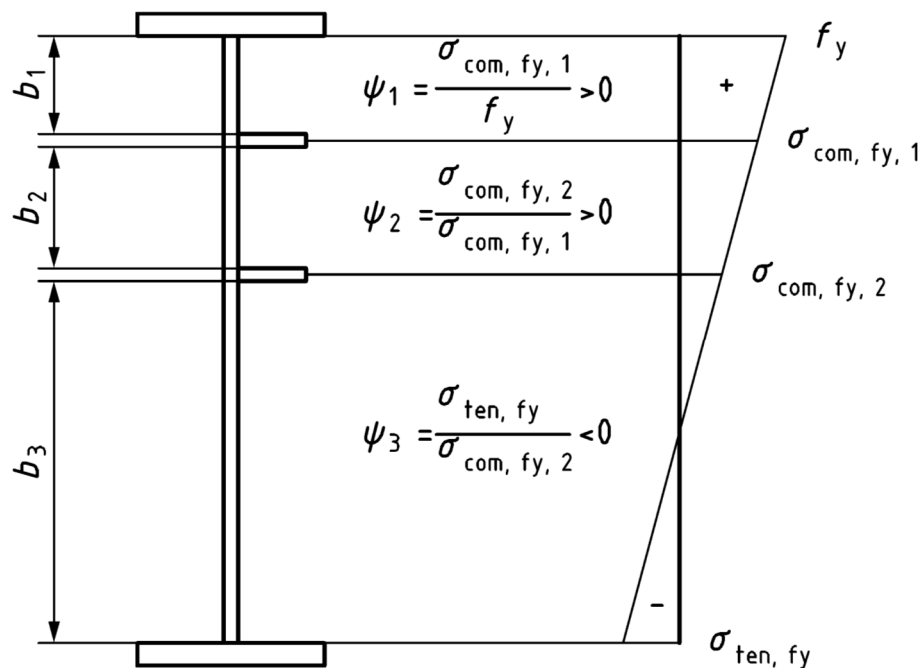


Рисунок 6.12 – Розподіл напружень, враховуваний для застосування згідно з 6.6.3

6.7 Перевіряння

(1) Перевіряння конструкційного елемента щодо осевого зусилля та одновісного згину виконують за такою формулою:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + e_N N_{Ed}}{\frac{f_y W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0, \quad (6.31)$$

де

A_{eff} – ефективна площа поперечного перерізу згідно з 6.3(3);

e_N – переміщення центрів ваги, див. 6.3(3);

M_{Ed} – розрахунковий згинальний момент;

N_{Ed} – розрахункове осьове зусилля;

W_{eff} – пружний момент опору ефективного поперечного перерізу в розглядуваній точці, див. 6.3(4);

γ_{M0} – частковий коефіцієнт, див. 4.2.

(2) Для конструкційних елементів, підданих осьовому зусиллю і двовісному згину, формулу (6.31) замінюють на формулу (6.32):

$$\eta_1 = \frac{N_{\text{Ed}}}{\frac{f_y A_{\text{eff}}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,\text{Ed}} + e_{y,N} N_{\text{Ed}}}{\frac{f_y W_{\text{eff},y}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,\text{Ed}} + e_{z,N} N_{\text{Ed}}}{\frac{f_y W_{\text{eff},z}}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0, \quad (6.32)$$

де

$M_{y,\text{Ed}}, M_{z,\text{Ed}}$ – розрахункові згинальні моменти відносно осей у-у та z-z відповідно;

$e_{y,N}, e_{z,N}$ – ексцентриситети відносно центра ваги;

$W_{\text{eff},y}, W_{\text{eff},z}$ – дорівнюють значенням $I_{\text{eff},y}/z$ та $I_{\text{eff},z}/y$, $I_{\text{eff},y}$ та $I_{\text{eff},z}$, є моментами інерції площі ефективного поперечного перерізу відносно головних осей, а y та z є відстанями між центром ваги й розглядуваною точкою, виміряними відповідно за напрямками головних осей.

(3) До ефектів дії M_{Ed} та N_{Ed} долучають загальні ефекти другого порядку, якщо застосовно.

(4) Перевіряння панелі на втрату стійкості пластини можна виконати стосовно рівнодійних напружень на виміряній від кінця панелі з більшим значенням напруження відстані, що становить $0,4a$ чи $0,5b$

залежно від того, яке з цих значень є найменшим,. У цій ситуації виконують також перевіряння опору перерізу бруто на кінці панелі.

(5) Перевіряння на втрату стійкості пластини у разі прямокутних панелей, які відповідають умовам 4.4(3), можна виконати із застосуванням ефектів дії на кожному кінці панелі:

– на відстані, що становить $0,5b_1$ від кінця панелі з меншим значенням ширини (див. поперечний переріз 1 на рисунку 6.13);

– на відстані, що становить:

$$0,5b_2, \text{ якщо } \frac{M_{Ed,2}}{M_{f,Rd,2}} \geq \frac{M_{Ed,3}}{M_{f,Rd,3}};$$

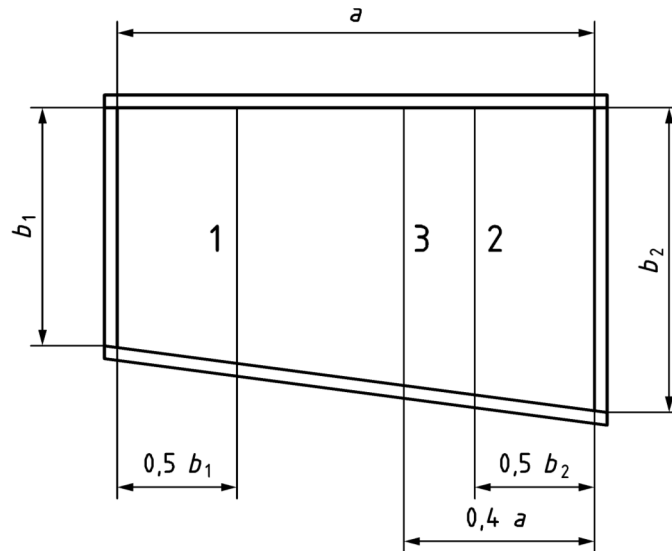
$$0,4a, \text{ якщо } \frac{M_{Ed,2}}{M_{f,Rd,2}} < \frac{M_{Ed,3}}{M_{f,Rd,3}},$$

яку вимірюють від кінця панелі з більшим значенням ширини, де

– $M_{Ed,2}$ та $M_{Ed,3}$ є розрахунковими згинальними моментами, що діють на відстані, відповідно, $0,5b_2$ та $0,4a$ від кінця панелі з більшим значенням ширини (див. перерізи 2 та 3 на рисунку 6.13);

– $M_{f,Rd,2}$ або $M_{f,Rd,3}$ є розрахунковими значеннями пластичного моменту внутрішніх зусиль у поперечному перерізі, що охоплює лише ефективну площу поясів, який діє на відстані відповідно $0,5b_2$ та $0,4a$ від кінця панелі з більшим значенням ширини (визначення $M_{f,Rd}$ подано у 9.1).

У цій ситуації виконують також перевіряння опору перерізу бруто на обох кінцях панелі.



Умовні позначки:

1 – переріз на відстані $0,5b_1$ від кінця з меншою шириною b_1 ;

2 – переріз на відстані $0,5b_2$ від кінця з більшою шириною b_2 ;

3 – переріз на відстані $0,4a$ від кінця з більшою шириною b_2

Рисунок 6.13 – Перевіряння поперечних перерізів у непрямокутній панелі

7 ОПІР ЗСУВУ

7.1 Загальні положення

(1) У цьому розділі викладено правила визначення опору зсуву пластин з урахуванням втрати стійкості за зсуву в граничному стані за несною здатністю, якщо дотримано відповідності таким критеріям:

а) панелі мають прямокутну форму або кутові розміри в межах, зазначених у 4.4 та на рисунку 4.1 (ϕ до 10°). Щодо непрямокутних панелей, які відповідають умовам 4.4(3), див. 7.1(3);

б) елементи жорсткості, за наявності, передбачено в поздовжньому чи поперечному напрямку або в обох напрямках;

с) усі отвори й вирізи мають малий розмір (див. 4.4);

д) конструкційні елементи мають постійний поперечний переріз;

е) для перевіряння кінцевих панелей передбачено кінцеві стояки.

Примітка. Щодо кінцевих панелей без кінцевих стояків див. 8.1(2) тип (с).

(2) Пластини, в яких значення h_w/t становить більше, ніж $\frac{72}{\eta} \varepsilon$ у разі непідкріпленої стінки, або $\frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$ у разі підкріпленої стінки, перевіряють щодо опору втраті стійкості за зсуву та забезпечують наявність поперечних елементів жорсткості поблизу опорних елементів, якщо прийнято значення $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$, де f_y в Н/мм².

Примітка 1. Щодо h_w див. рисунок 7.1; щодо k_τ див. 7.3(3).

Примітка 2. Значення η дорівнює 1,20 у разі марок сталі до S460 та 1,00 у разі марок сталі вище S460, якщо в Національному додатку не вказано інших значень.

(3) У разі непрямокутних панелей, які відповідають умовам 4.4(3), перевіряння підданої зсуву панелі можна виконати із застосуванням ефектів розрахункових дій у місцях, визначених у 6.7(5). Зсувні зусилля обчислюють з урахуванням сумісної дії напружень, спричинених нахилом поясу.

7.2 Розрахунковий опір

(1) Розрахунковий опір зсуву непідкріплених чи підкріплених стінок визначають за формулою:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (7.1)$$

у якій сумісну дію, спричинену стінкою, визначають так:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (7.2)$$

сумісну роботу поясів $V_{bf,Rd}$ визначають згідно з 7.4.

(2) Елементи жорсткості проєктують згідно з вимогами, установленними в 11.3, а зварні шви – дотримуючи вимог 11.3.5.

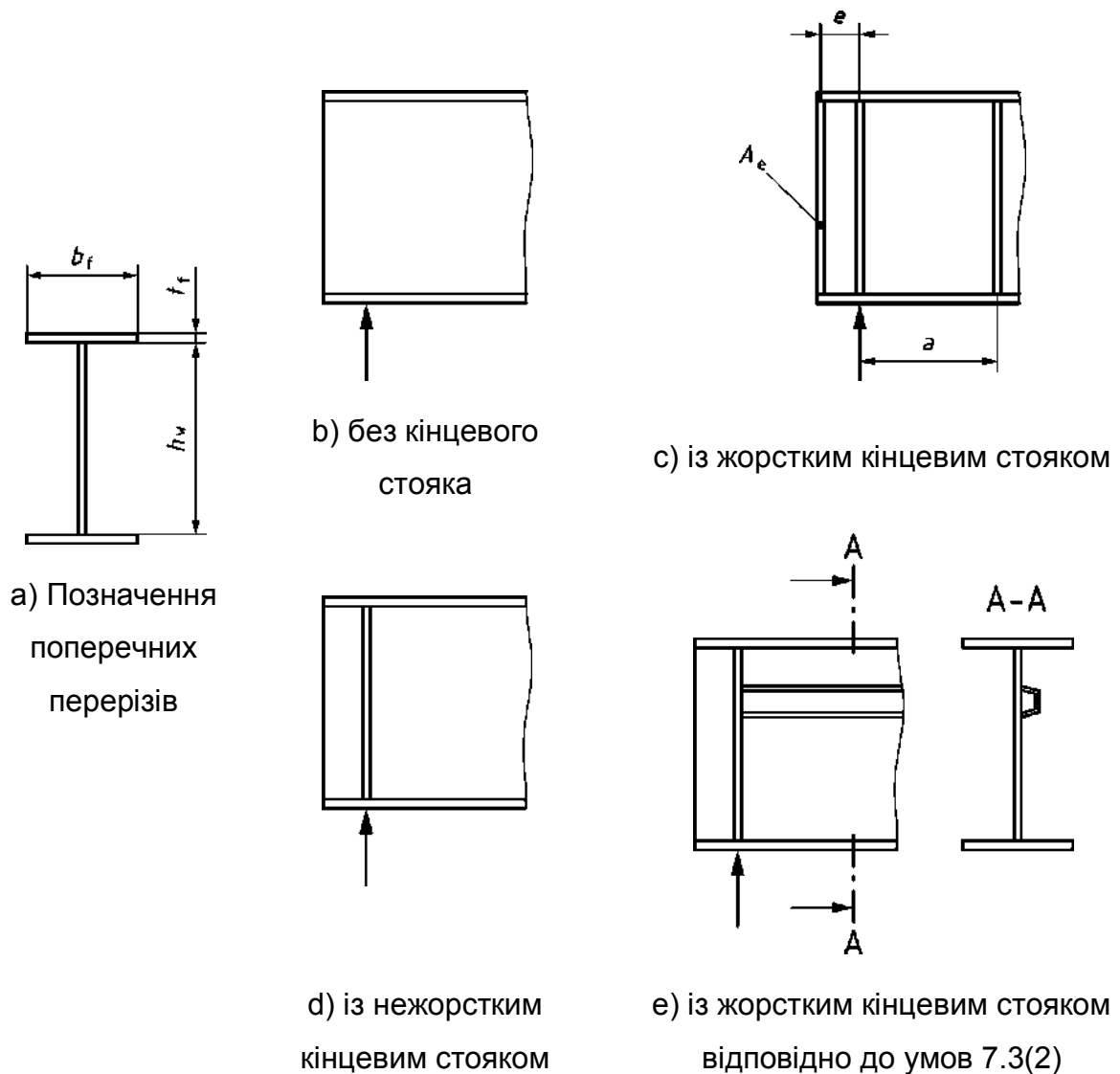


Рисунок 7.1 — Кінцеві опорні елементи

7.3 Внесок до несної здатності, утворюваний стінкою

(1) Для стінок із поперечними елементами жорсткості, розташованими лише поблизу опорних елементів, а також для стінок або з проміжними поперечними елементами жорсткості, або з поздовжніми елементами жорсткості, або з цими обома видами елементів жорсткості, коефіцієнт χ_w для врахування внеску стінки до забезпечення опору зсуву за втрати стійкості визначають із таблиці 7.1 або згідно з рисунком 7.2. Коефіцієнт χ_w згідно з таблицею 7.1 чи рисунком 7.2 є дійсним лише у разі застосування до значень гнучкості $\bar{\lambda}_w$, заданих для пластин, для яких граничними умовами передбачено утворення шарнірів.

Таблиця 7.1 – Внесок, утворюваний стінкою, χ_w , до опору втраті стійкості за зсуву

	Кінцеві панелі з нежорстким кінцевим стояком	Усі інші ситуації (проміжні панелі та кінцеві панелі з жорстким кінцевим стояком)
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$\frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$\frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w}$

(2) На рисунку 7.1 зображено різні проєктні рішення кінцевих опорних елементів для балок:

- а) без кінцевого стояка, див. 8.1(2), тип с) та рисунок 7.1 b);
- б) із жорсткими кінцевими стояками, див. 11.3.1 і рисунок 7.1 с);
- с) із нежорсткими кінцевими стояками, див. 11.3.2 і рисунок 7.1 d).

У разі стінок, підкріплених поздовжніми елементами жорсткості з замкненим перерізом, які приєднано до кінцевих стояків і вертикальних елементів жорсткості, кінцеві стояки завжди можна розглядати як жорсткі (див. рис. 7.1 е).

Примітка. На рисунках 7.1 d) та е) поперечний елемент жорсткості може бути однобічним чи двобічним, якщо він відповідає всім умовам розділу 11.

(3) Умовну гнучкість $\bar{\lambda}_w$ для врахування втрати стійкості за зсуву згідно з таблицею 7.1 і рисунком 7.2 визначають за формулою:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}}, \quad (7.3)$$

у якій

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E, \quad (7.4)$$

а величину σ_E визначають за формулою (6.6).

Примітка. Значення k_t може бути обчислено згідно з А.5, з використанням діаграм або числових моделей.

(4) Якщо поперечні елементи жорсткості є лише поблизу опорних елементів, а поздовжніх елементів жорсткості немає, то умовну гнучкість $\bar{\lambda}_w$ для врахування втрати стійкості за зсуву можна визначити за такою формулою:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \quad (7.5)$$

(5) Якщо на додаток до жорстко сполучених поперечних елементів жорсткості використовують також нежорстко сполучені поперечні елементи жорсткості, то k_t приймають як найменше зі значень, які стосуються ділянок стінки між будь-якими двома поперечними елементами жорсткості (наприклад, $a_2 \times h_w$ та $a_3 \times h_w$) та між двома жорстко сполученими елементами жорсткості, що охоплюють нежорстко сполучені поперечні елементи жорсткості (наприклад, $a_4 \times h_w$), див. рисунок 7.3. Визначення жорстко сполучених і нежорстко сполучених поперечних елементів жорсткості подано в 11.3.3.

(6) Граничні умови жорсткого сполучення допустимо приймати для панелей, суміжних зі стінками й жорстко сполученими поперечними елементами жорсткості. Розрахунок стінки щодо втрати стійкості можна виконати із застосуванням панелей, розташованих між двома суміжними поперечними елементами жорсткості (наприклад, $a_1 \times h_w$ на рисунку 7.3).

(7) У разі двох чи більше суміжних нежорстко сполучених поперечних елементів жорсткості мінімальне значення k_t можна отримати з розрахунку на втрату стійкості, розглядаючи:

– комбінацію двох суміжних ділянок стінки з одним гнучким поперечним елементом жорсткості;

– комбінацію трьох суміжних ділянок стінки з двома гнучкими поперечними елементами жорсткості.

(8) Виконуючи розрахунок k_{τ} , момент інерції площі поздовжнього елемента жорсткості з незамкненим перерізом зменшують до 1/3 його фактичного значення.

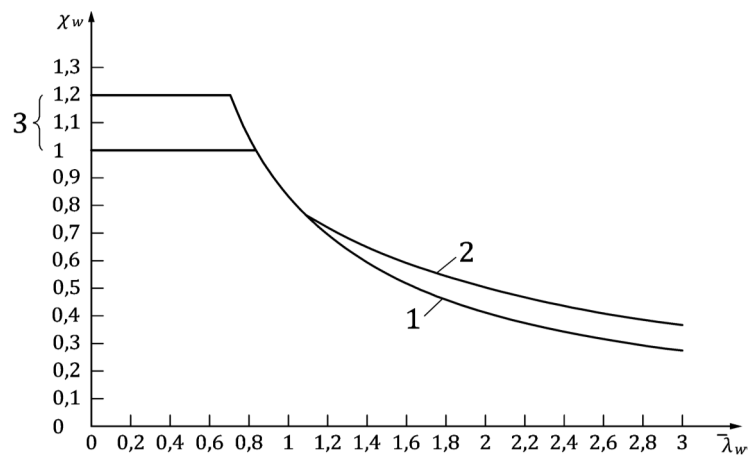
Примітка. В А.5 у формулах обчислення k_{τ} це зменшення неявно враховано.

(9) У разі стінок із поздовжніми елементами жорсткості умовну гнучкість $\bar{\lambda}_w$ для врахування втрати стійкості за зсуву згідно з (3) приймають не меншу за таке значення:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_{ti}}}, \quad (7.6)$$

де h_{wi} та k_{ti} стосуються субпанелі з найбільшою умовною гнучкістю $\bar{\lambda}_w$ стосовно втрати стійкості за зсуву порівняно з усіма іншими субпанелями у межах розглядуваної ділянки стінки (панелі).

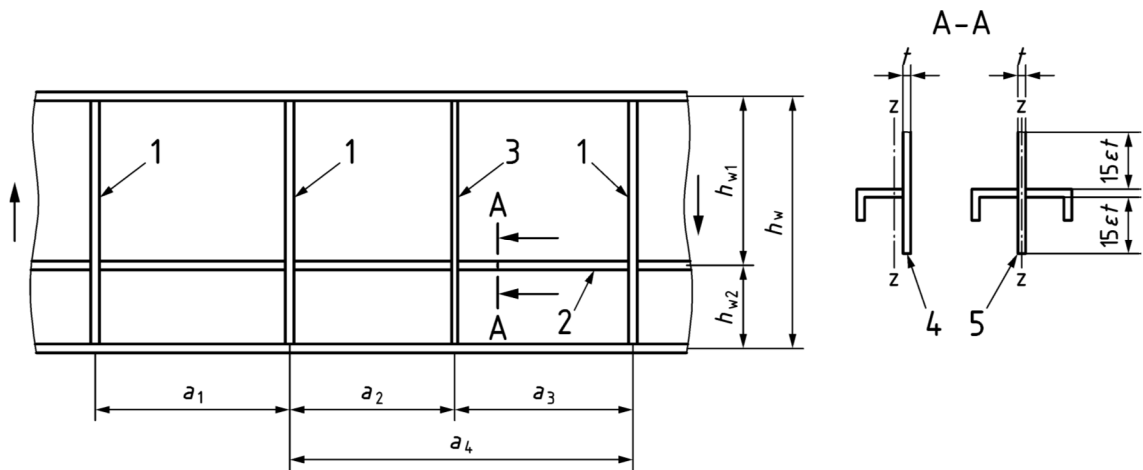
Примітка. Вираз, поданий у А.5, може бути застосовано для обчислення k_{ti} за врахування $k_{\tau,sl} = 0$.



Умовні позначки:

- 1 – нежорсткий кінцевий стояк;
- 2 – всі інші ситуації (жорсткі кінцеві стояки, проміжні елементи жорсткості);
- 3 – діапазон рекомендованих значень η

Рисунок 7.2 – Понижувальний коефіцієнт χ_w для врахування втрати стійкості за зсуву



Умовні позначки:

- 1 – жорстко сполучений поперечний елемент жорсткості;
- 2 – поздовжній елемент жорсткості;
- 3 – нежорстко сполучений поперечний елемент жорсткості;
- 4 – приклад однобічного елемента жорсткості;
- 5 – приклад двобічного елемента жорсткості

Рисунок 7.3 – Стінка з поперечними та поздовжніми елементами жорсткості

7.4 Внесок до несної здатності, утворюваний поясами

(1) Якщо розрахунковий згинальний момент поясу не відповідає повною мірою згинальному моменту, що діє в ньому ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), то утворюваний поясом внесок (до несної здатності) визначають за такою формулою:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right), \quad (7.7)$$

де

b_f та t_f – визначають для поясу, в якому забезпечено найменший опір в осьовому напрямку, причому b_f приймають щонайбільше $15 \cdot \varepsilon \cdot t_f$ з кожного боку стінки;

$M_{f,Rd}$ – розрахунковий момент внутрішніх зусиль у пластичній стадії поперечного перерізу, що охоплює лише ефективну площу поясів;

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6b_f t_f^2 f_{yf}}{th_w^2 f_{yw}} \right) \quad (7.8)$$

(2) Якщо діє осьове зусилля N_{Ed} , значення $M_{f,Rd}$ зменшують, помноживши його на такий коефіцієнт:

$$\left(1 - \frac{N_{Ed}}{\frac{(A_{f1} + A_{f2})f_{yf}}{\gamma_{M0}}} \right), \quad (7.9)$$

де A_{f1} та A_{f2} – площі верхнього й нижнього поясів відповідно, а N_{Ed} – абсолютне значення поздовжньої (нормальної) сили. Щодо визначення γ_{M0} див. 4.2.

7.5 Перевіряння

(1) Перевіряння виконують, як зазначено нижче:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0, \quad (7.10)$$

де

V_{Ed} – розрахункове значення сили зсуву з урахуванням зсуву внаслідок кручення.

8 ОПІР МІСЦЕВОМУ РОЗПОДІЛЕНОМУ НАВАНТАЖЕННЮ

8.1 Загальні положення

(1) Розрахунковий опір стінок балок із прокатного профілю і зварних ферм, підданих місцевому впливу сил у площині (місцевому розподіленому навантаженню), визначають згідно з 8.2 за умови, що підданий стиску пояс відповідним способом закріплено від переміщень у поперечному напрямку.

(2) Застосовують такі способи прикладання навантаги:

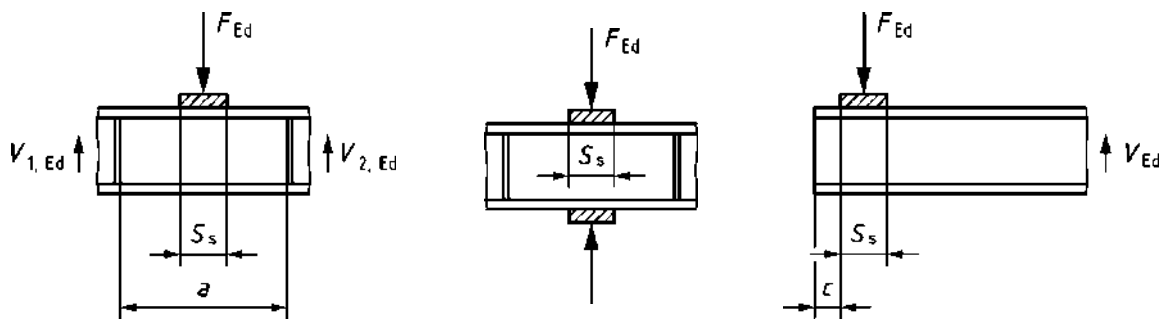
а) через пояс (лист поясу) на стінку, утворюючи опір зсувним зусиллям у стінці, див. рис. 8.1 (а);

б) через один пояс (лист поясу) із передаванням зусиль через стінку безпосередньо на інший пояс, див. рисунок 8.1 (б);

с) через один пояс (лист поясу), що примикає до кінця (кінцевого листа), де немає елементів жорсткості, дивіться рисунок 8.1 (с).

(3) У разі балок, виконаних із коробчастого профілю з установленими під кутом (похилими) стінками, виконують перевіряння як стінки, так і поясу. Внутрішні зусилля, які має бути враховано, розглядають як складники зовнішньої навантаги в площині стінки й поясу, відповідно.

(4) Перевіряння взаємодії поперечної сили, згинального моменту та осової сили виконують із дотриманням положень 9.2.



$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2$$

$$k_F = 3,5 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2$$

$$k_F = 2 + 6 \left(\frac{s_s + c}{h_w} \right) \leq 6$$

Рисунок 8.1 – Коефіцієнти для врахування втрати стійкості за різних типів прикладання навантаги

8.2 Розрахунковий опір

(1) Розрахунковий опір місцевій втраті стійкості непідкріплених чи підкріплених стінок, підданих дії поперечних сил, визначають за такою формулою:

$$F_{Rd} = \frac{\chi_F \ell_y t_w f_{yw}}{\gamma_{M1}}, \quad (8.1)$$

де

t_w — товщина стінки;

f_{yw} — границя текучості стінки;

ℓ_y – ефективна довжина в навантаженому стані, див. 8.5, що відповідає довжині розподілу навантаги через жорсткі опорні елементи, s_s , див. 8.3;

χ_F – понижувальний коефіцієнт для врахування місцевої втрати стійкості, див. 8.4(1);

γ_{M1} – частковий коефіцієнт, див. 4.2.

8.3 Довжина розподілу навантаги через жорсткі опорні елементи

(1) Довжину розподілу навантаги на пояс через жорсткі опорні елементи, s_s , визначають як відстань, на якій відбувається ефективне розподілення прикладеної навантаги за нахилу 1:1, див. рисунок 8.2. Однак, значення s_s приймають таке, що не перевищує h_w .

(2) Якщо кілька зосереджених сил діють у близько розташованих одне від одного місцях, то перевіряння опору виконують щодо кожної окремої сили, а також щодо загального навантаження із застосуванням s_s як відстані між центрами прикладених зовнішніх навантаг.

(3) Якщо опорна поверхня, до якої прикладено навантагу, розташована під кутом до поверхні поясу, див. рисунок 8.2, то значення s_s приймають як таке, що дорівнює нулю.

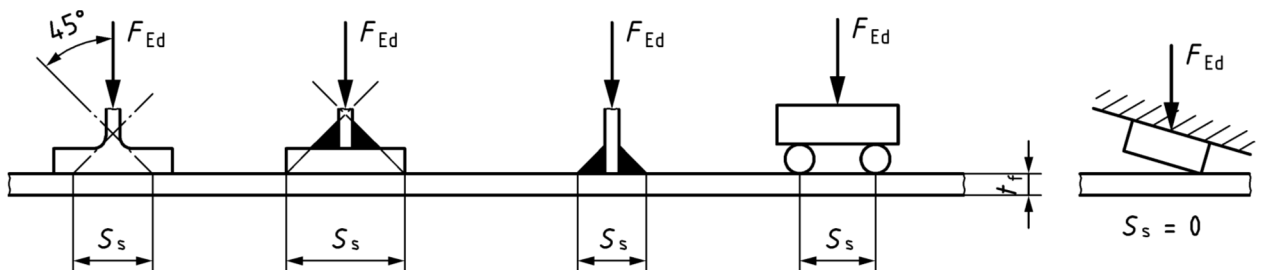


Рисунок 8.2 – Довжина розподілу навантаги через жорсткі опорні елементи

8.4 Понижувальний коефіцієнт χ_F

(1) Понижувальний коефіцієнт χ_F визначають за дотримання критерію згідно з формулою:

$$\chi_F = \frac{1,0}{\varphi_F + \sqrt{\varphi_F^2 - \bar{\lambda}_F}} \leq 1,0, \quad (8.2)$$

у якій

$$\varphi_F = \frac{1}{2} (1 + \alpha_{F0}(\bar{\lambda}_F - \bar{\lambda}_{F0}) + \bar{\lambda}_F); \quad (8.3)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}; \quad (8.4)$$

$$\alpha_{F0} = 0,75; \quad (8.5)$$

$$\bar{\lambda}_{F0} = 0,50;$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (8.6)$$

(2) У разі стінок без поздовжніх елементів жорсткості k_F визначають згідно з рисунком 8.1.

Примітка. Для стінок із поздовжніми елементами жорсткості k_F можна визначити згідно з додатком А (А.6) чи із застосуванням числової моделі згідно з 4.6.

(3) Значення ℓ_y обчислюють згідно з 8,5.

8.5 Ефективна довжина за прикладеної навантаги

(1) У разі прикладання навантаги за типами а) і b), зазначеними на рисунку 8.1, ефективну довжину ℓ_y за прикладеної навантаги розраховують так:

$$\ell_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1}), \quad (8.7)$$

але ℓ_y має становити не більше за відстань між суміжними поперечними елементами жорсткості.

(2) У разі прикладання навантаги за типом с) значення ℓ_y приймають як найменше зі значень, отриманих за допомогою формул (8.7), (8.8) та (8.9).

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2}} + \left(\frac{\ell_e}{t_f} \right)^2 + m_2 ; \quad (8.8)$$

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} , \quad (8.9)$$

де

$$\ell_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (8.10)$$

(3) Значення параметрів m_1 та m_2 розраховують за такими формулами:

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w} ; \quad (8.11)$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 & \text{за умови } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ 0, & \text{за умови } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{cases} \quad (8.12)$$

У разі коробчастих балок застосовуване у формулі (8.11) b_f має становити щонайбільше $15 \cdot \varepsilon \cdot t_f$ з кожного боку стінки.

8.6 Перевіряння

(1) Перевіряння виконують із дотриманням такого критерію:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0 , \quad (8.13)$$

де

F_{Ed} – розрахункова поперечна сила;

F_{Rd} – розрахунковий опір місцевій втраті стійкості за дії поперечних сил, див. 8.2(1).

9 ВЗАЄМОДІЯ ЗУСИЛЬ

9.1 Взаємодія зсувного зусилля, згинального моменту й осьового зусилля

(1) Якщо $\bar{\eta}_3$ (див. нижче) не перевищує 0,5, то розрахунковий опір згинальному моменту та осьовій силі для врахування зсувного зусилля зменшувати не потрібно. Якщо $\bar{\eta}_3$ становить більше 0,5, то забезпечують такі умови, за яких сумарні ефекти від втрати стійкості та зсуву в стінці двотаврової чи коробчастої балки задовольнятимуть такому критерію:

$$\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{eff,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^\mu \leq 1,0 \text{ за умови } \eta_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{eff,Rd}}, \quad (9.1)$$

де

$M_{f,Rd}$ – характеристичне значення моменту внутрішніх зусиль в пластичній стадії поперечного перерізу, який охоплює лише ефективну площу поясів;

$$M_{eff,Rd} = W_{eff} f_y / \gamma_{M0}; \quad (9.2)$$

η_1 – див. у 6.7(1);

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}; \quad (9.3)$$

щодо $V_{bw,Rd}$ див. формулу (7.2);

$$\mu = \left(\frac{M_{f,Rd}}{M_{eff,Rd}} + 0,2 \right)^{15} + 1 \quad (9.4)$$

(2) До ефектів дій на конструкційні елементи долучають загальні ефекти другого порядку, якщо застосовно.

(3) На відповідність зазначеному в (1) критерію перевіряють всі перерізи, крім розташованих на відстані, що становить менше $h_w/2$, вимірюючи від опорного елемента з вертикальними елементами жорсткості.

(4) У разі прямокутних панелей, які відповідають умовам 4.4(3), перевіряння відповідності щодо (9.1) виконують з урахуванням ефекту розрахункової дії в місцях, визначених у 6.7(5) та 7.1(3).

(5) Розрахунковий пластичний момент внутрішніх зусиль у поперечному перерізі, $M_{f,Rd}$, можна визначити як добуток значень границі текучості, ефективної площі поясу та (у разі неідентичних поясів) найменшого зі значень: $A_f f_y$ чи відстані між центрами ваги поясів, поділений на γ_{M0} .

(6) Якщо виникає осьове зусилля N_{Ed} , то значення $M_{eff,Rd}$ та $M_{f,Rd}$ зменшують згідно з 8.2.9 EN 1993-1-1:2022 та 7.4(2) відповідно. Якщо осьове зусилля настільки велике, що стиску піддано всю стінку, то застосовують положення (7).

(7) Перевіряння поясу коробчастої балки виконують із застосуванням положень (1), прийнявши значення $M_{f,Rd} = 0$ та $\bar{\eta}_3 = \tau_{Ed} / (\gamma_{M1} \sqrt{3} f_{y,f})$, де τ_{Ed} – середнє зсувне напруження в поясі, що становить не менше половини максимального зсувного напруження в поясі, а $f_{y,f}$ – границя текучості розглядуваного поясу. До дії зсувних напружень долучають взаємодію зсувних зусиль і крутильного моменту. Крім того, виконують перевіряння субпанелей, використовуючи середнє зсувне напруження усередині субпанелі та коефіцієнт χ_w , визначений згідно з 7.3 для врахування втрати стійкості за зсуву субпанелі згідно з припущенням щодо жорсткого сполучення поздовжніх елементів жорсткості.

9.2 Взаємодія поперечного зусилля, згинального моменту й осьового зусилля

(1) Якщо балку піддано зосередженій поперечній силі, що діє на пояс, підданий стиску разом зі згинальною та осьовою силами, то

перевіряння щодо опору виконують із застосуванням положень 6.7, 8.6 та зазначеного нижче критерію взаємодії:

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4, \quad (9.5)$$

де η_2 визначають згідно з 8.6(1).

(2) Якщо зосереджена навантага діє на пояс, підданий розтягу, то перевіряння опору виконують відповідно до розділу 8. Крім того, дотримують відповідності вимогам 8.2.1(5) EN 1993-1-1:2022.

9.3 Взаємодія поперечного зусилля, згинального моменту і зсувного зусилля

(1) Перевіряння цієї взаємодії виконують, якщо $\eta_2 > 0,1$, де η_2 визначають згідно з 8.6(1). Якщо $\eta_2 \leq 0,1$, то перевіряння застосовують лише до взаємодії згинального моменту та поперечного зусилля згідно з 9.1.

(2) Якщо балку піддано зосередженій поперечній силі, що діє на підданий стиску пояс у поєднанні зі згинальним моментом і зсувним зусиллям, то перевіряння опору виконують із застосуванням положень 6.7, 7.5, 8.6 та зазначеної нижче формули взаємодії:

$$(\bar{\eta}_1)^{3,6} + \left[\bar{\eta}_3 \left(1 - \frac{F_{Ed}}{2V_{Ed}} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0, \quad (9.6)$$

де

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{f,eff,Rd}};$$

$M_{f,eff,Rd}$ – розрахунковий момент внутрішніх зусиль у пластичній стадії поперечного перерізу, що охоплює ефективну площу поясів і повну ефективну площу перерізу стінки, незалежно від класу її перерізу;

$\bar{\eta}_3$ – визначено в 9.1(1).

10 ВТРАТА СТІЙКОСТІ, СПРИЧИНЕНА СТІНКОЮ

(1) Щоб запобігти втраті стійкості підданого стиску поясу в площині стінки, забезпечують дотримання такого критерію:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{\beta f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}, \quad (10.1)$$

де

A_w – площа поперечного перерізу стінки;

A_{fc} – ефективна площа поперечного перерізу поясу, підданого стиску;

h_w – висота стінки;

t_w – товщина стінки.

Приймають таке значення коефіцієнта k :

за умов повертання в пластичній стадії: $k = 0,3$;

для застосування до опору щодо моменту в пластичній стадії:
 $k = 0,4$;

для застосування до опору щодо моменту в пружній стадії:
 $k = 0,55$.

Значення коефіцієнта β обчислюють так:

$$\beta = \left[\frac{\sigma_{Ed}}{2f_{yf}} (1 - \psi) \right]^{0,5} \geq 0,5 \text{ за умови } -1 \leq \psi \leq 1 ;$$

$$\beta = \left[\frac{\sigma_{Ed}}{2f_{yf}} \left(1 - \frac{1}{\psi} \right) \right]^{0,5} \geq 0,5 \text{ за умови } \psi < -1 ,$$

де

ψ – коефіцієнт напружень, визначений згідно з 6.4.1(3) та 6.4.1(4);

σ_{Ed} – максимальне розрахункове стискальне напруження у поясі.

(2) Якщо балка має вигин за висотою, а підданий стиску пояс перебуває з увігнутого боку, дотримують відповідності такому критерію:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}}{\sqrt{\beta^2 + \frac{\sigma_{Ed} h_w E}{3 r f_{yf}^2}}}, \quad (10.2)$$

де r – радіус кривизни поясу, підданого стиску.

(3) Як альтернативний варіант, перевіряння щодо спричиненої поясом втрати стійкості ділянки стінки, підданої дії двовісного навантаження (тобто напружень згину та радіального стиску), можна виконати із застосуванням методу, зазначеного в розділі 12.

11 ЕЛЕМЕНТИ ЖОРСТКОСТІ ТА ЇХНЄ ДЕТАЛЮВАННЯ

11.1 Загальні положення

(1) У цьому розділі викладено правила проєктування елементів жорсткості в пластинчастих конструкційних елементах, що доповнюють правила, застосовні у ситуації втрати стійкості пластин, зазначені в розділах 6–9.

(2) Перевіряння опору втраті стійкості можна виконати, розглянувши ефективний поперечний переріз елемента жорсткості, прийнятий як площа перерізу бруто, що охоплює елемент жорсткості плюс ширина пластини, що дорівнює $15 \cdot \varepsilon \cdot t$, але не перевищує наявного розміру, фактично виміряного з кожного боку елемента жорсткості, уникаючи будь-якого перекривання унапуск із частинами суміжних елементів жорсткості, що впливають на його опір, див. рисунок 11.1.

(3) Осьове зусилля в поперечному елементі жорсткості визначають як суму значень зусиль, що виникають унаслідок зсуву (див. 11.3.3(4)) та будь-яких зовнішніх навантаж.

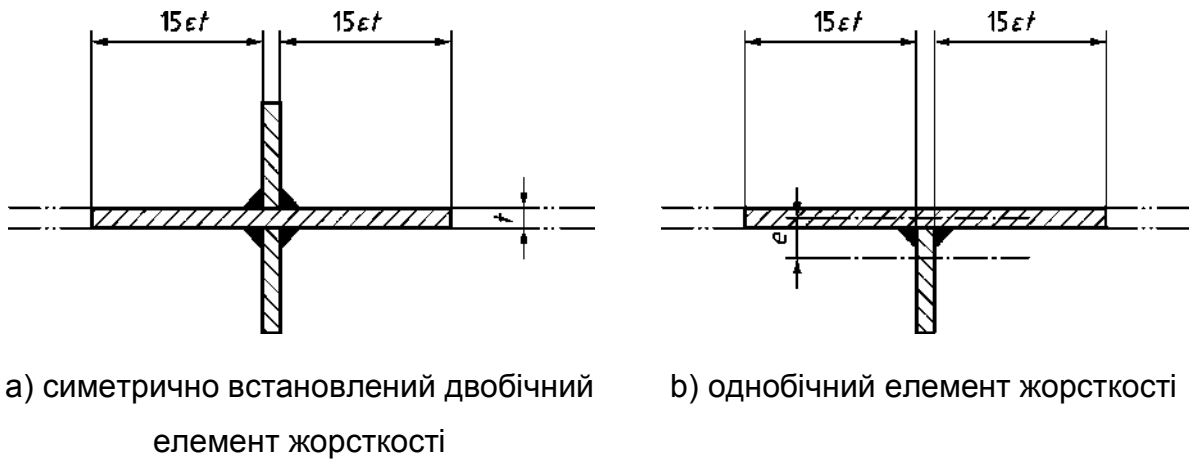


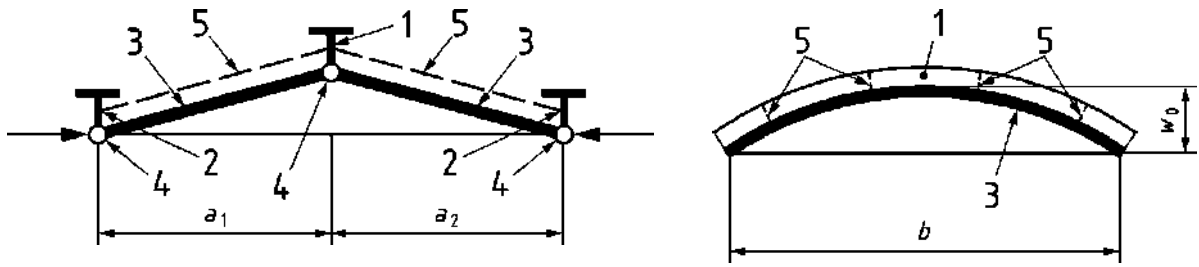
Рисунок 11.1 – Ефективний поперечний переріз поперечного елемента жорсткості

11.2 Поздовжні напруження

11.2.1 Мінімальні вимоги щодо поперечних елементів жорсткості

(1) Щоб забезпечити жорсткість опорного елемента для пластини з поздовжніми елементами жорсткості чи без них, стосовно проміжних поперечних елементів жорсткості дотримують зазначених нижче критеріїв.

(2) Поперечний елемент жорсткості розглядають як шарнірно обпертий елемент, підданий бічному навантаженню, з початковою синусоїдальною недосконалістю w_0 , що дорівнює $s/200$, де s є найменшим зі значень: a_1 , a_2 чи b , див. рисунок 11.2, з яких a_1 та a_2 – значення довжини панелей, прилеглих до розглядуваного поперечного елемента жорсткості, а b – висота, виміряна між центрами ваги поясів або прогін поперечного елемента жорсткості. Враховують також ексцентриситети.



а) поздовжній розріз через центральну вісь панелі б) поперечний переріз оцінюваного елемента жорсткості

Умовні позначки:

- 1 – оцінюваний поперечний елемент жорсткості (вигнутий);
- 2 – суміжні поперечні елементи жорсткості (прямі);
- 3 – основна пластина;
- 4 – поперечні шарнірні примикання;
- 5 – поздовжні елементи жорсткості (якщо є)

Рисунок 11.2 – Геометричні параметри для розрахунку згинальних зусиль у поперечному елементі жорсткості

(3) Поперечний елемент жорсткості сприймає зусилля унаслідок згину від суміжних підданих стиску панелей за умови, що обидва суміжні поперечні елементи жорсткості є жорстко сполученими та прямолінійними і до них прикладено будь-яку зовнішню навантагу разом з осьовою силою згідно з 11.3.3(4). Піддані стиску панелі та поздовжні елементи жорсткості розглядають як шарнірно обперті на поперечні елементи жорсткості.

(4) Перевіряння виконують із застосуванням методу пружного розрахунку другого порядку для забезпечення усіх зазначених нижче критеріїв відповідності елемента жорсткості умовам граничного стану за несною здатністю, що стосуються:

- максимального напруження в елементі жорсткості, що не перевищуватиме значення f_y/γ_{M1} ;
- додаткового прогину, що не перевищуватиме $b/500$;

– моменту інерції площі, I_{st} , ефективного поперечного перерізу поперечного елемента жорсткості разом із прилеглою частиною пластини згідно з 11.1(2), який перевищуватиме значення:

$$I_{st,min} = \frac{3,92nI_b b^3}{\pi^2 a^3}, \quad (11.1)$$

де

I_b – момент інерції площі у разі роботи із площини перерізу, що охоплює поздовжній елемент жорсткості й прилеглу до нього з кожного боку частину пластини, ширина якої дорівнює половині відстані до суміжного елемента жорсткості (див. рис. 6.5 ліворуч та рисунок 11.3);

n – кількість поздовжніх елементів жорсткості у межах пластини;

$a = \min\{a_1; a_2\}$ – мінімальна довжина розглядуваних панелей.

(5) За відсутності осьового зусилля в поперечному елементі жорсткості зазначені в (4) критерії можна вважати дотриманими за умови, що момент інерції площі, I_{st} , ефективного поперечного перерізу поперечного елемента жорсткості разом із частиною суміжної пластини згідно з 11.1(2) становить щонайменше:

$$I_{st,lim} = \frac{\sigma_m}{E} \left(\frac{b}{\pi} \right)^4 \left(1 + w_0 \frac{500}{b} u \right), \quad (11.2)$$

де

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ct,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{Ed}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right), \quad \text{якщо } u > 1,0; \quad (11.3)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ct,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{cr}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right), \quad \text{якщо } u = 1,0; \quad (11.4)$$

$$u = \min \left\{ \frac{\pi^2 E e_{max}}{500 b f_y}; \frac{3,92 N_{cr} e_{max} b^2}{500 \pi^2 a I_{st} f_y} \right\} \geq 1,0; \quad (11.5)$$

e_{max} – максимальна відстань від найвіддаленішої точки ефективного перерізу елемента жорсткості до його центру ваги;

f_y – границя текучості елемента жорсткості;

N_{Ed} – максимальне стискальне зусилля суміжних панелей, але не менше ніж максимальне стискальне напруження, помножене на половину підданої стиску ефективної^p площі перерізу панелі включно з елементом жорсткості;

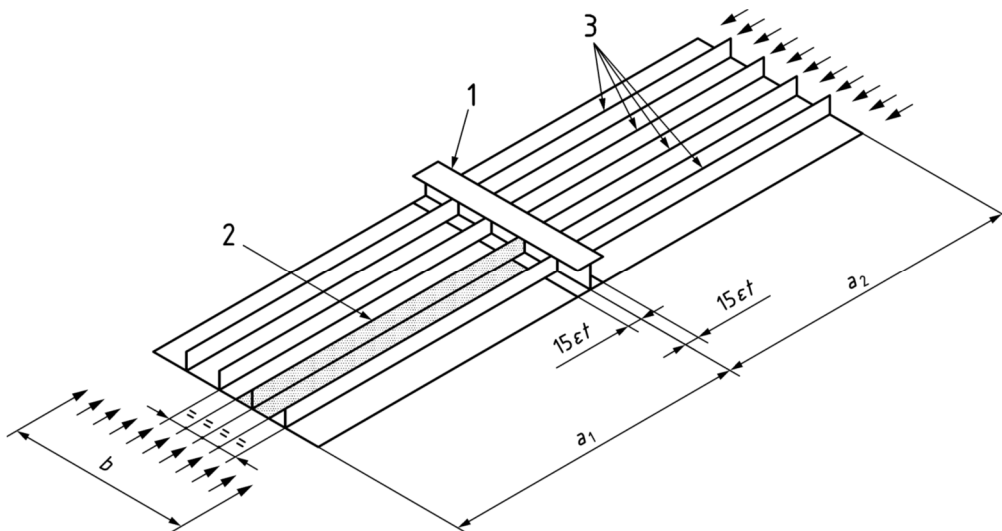
N_{cr} – критична навантага за втрати стійкості панелі, з урахуванням роботи у разі втрати стійкості за типом стрижня і за припущення, що поперечні елементи жорсткості є шарнірно сполученими опорами, обчислена за формулою (11.6);

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 n E I_b}{a^2}, \quad (11.6)$$

де

a та I_b – визначення див. у (4);

$\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ – визначають згідно з 6.5.2 та 6.5.3.



Умовні позначки:

1 – поперечний елемент жорсткості: мінімальний момент інерції площі дорівнює I_{st} ;

2 – поздовжній елемент жорсткості: момент інерції площі, I_b , за згину із площини поперечного перерізу;

3 – n , що дорівнює кількості поздовжніх елементів жорсткості

Рисунок 11.3 – Приклад поясу коробчастої балки, підданої лише стиску

(6) Якщо елемент жорсткості сприймає стиск в осьовому напрямку, то його збільшують для врахування згинальних зусиль. Застосовують зазначені в (4) критерії, але значення ΔN_{st} у разі обчислення рівномірних напружень, спричинених осьовою навантагою в ефективному поперечному перерізі елемента жорсткості, враховувати не потрібно.

(7) Як альтернативний варіант, дотримання вимоги (4) можна перевірити за відсутності осьових зусиль, застосовуючи пружний розрахунок першого порядку з урахуванням зазначеної нижче додаткової еквівалентної рівномірно розподіленої поперечної навантаги q , що діє за довжиною b :

$$q = \frac{\pi}{4} \sigma_m (w_0 + w_{el}) ; \quad (11.7)$$

де

σ_m – визначають згідно з (5) вище за припущення, що $u > 1,0$;

w_0 – визначають згідно з 11.2.1 (2), див. рисунок 11.2;

w_{el} – пружна деформація, яку можна визначити методом ітерації чи прийняти як максимальне додаткове відхилення $b/500$.

(8) Якщо не застосовують більш досконалий метод розрахунку, то, щоб запобігти втраті стійкості за крутильною формою підданих стиску з навантаженням в осьовому напрямку елементів жорсткості з незамкненими поперечними перерізами, дотримують відповідності такому критерію:

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} , \quad (11.8)$$

де

I_p – полярний момент інерції площі лише елемента жорсткості, розрахований відносно кромки, сполученої з пластиною;

I_T – константа кручення Сен-Венана, застосовна лише до елемента жорсткості.

(9) Якщо під час обчислення σ_{cr} явно враховують деформаційну жорсткість підданого стиску з навантагою в осьовому напрямку елемента жорсткості з незамкненим поперечним перерізом, то зазначену в (8) умову можна замінити на умову, подану у формулі (11.9).

$$\sigma_{cr} \geq 6 f_y, \quad (5.1)$$

де

σ_{cr} – критичне напруження у пружній стадії елемента жорсткості у разі втрати стійкості за крутильною формою без урахування защемлення від повертання з боку основної пластини, за винятком ситуації, у якій защемлення від повертання основної пластини визначають з урахуванням втрати жорсткості, що виникає внаслідок одночасної з елементом жорсткості втрати стійкості за комбінованою формою.

11.2.2 Мінімальні вимоги щодо поздовжніх елементів жорсткості

(1) Вимоги, зазначені в 11.2.1(8) та (9) щодо втрати стійкості за крутильною формою, застосовують також до поздовжніх елементів жорсткості.

(2) Переривчасті поздовжні елементи жорсткості, які не проходять через виконані в поперечних елементах жорсткості отвори або не мають жодного бічного з'єднання з поперечними елементами жорсткості, проєктують так, щоб:

– їх було використано тільки для стінок (тобто, у поясах їх використання не допустимо);

– їх не було враховано у загальному розрахунку;

- їх не було враховано в обчисленні напружень;
- їх було враховано в обчисленні ефективної^p ширини субпанелей стінки;
- їх було враховано в обчисленні критичних напружень у пружній стадії.

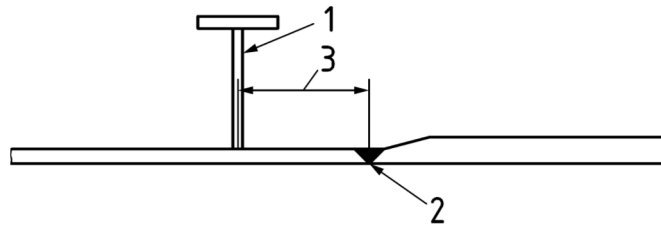
(3) Оцінювання міцності елементів жорсткості виконують відповідно до 6.5.3 та 6.7.

(4) Якщо для приєднання елемента жорсткості застосовують переривчасті кутові зварні шви, то забезпечують відповідність довжини зварних швів L_w та довжини проміжків L_2 між кінцями кожного відтинку за довжиною зварного шва вимогам рисунка 6.2 у EN 1993-1-8:2024, а також вимогам EN 1993-1-9¹: таблиці 9.3 (категорія деталей 7) щодо ситуації дії від циклічних навантаж.

11.2.3 Пластини, приєднані зварним швом

(1) Зварні з'єднання пластин, що мають змінну товщину, розташовують поряд із поперечним елементом жорсткості, див. рисунок 11.4. Ефекти ексцентриситету враховувати не потрібно за винятком ситуації, в якій відстань до елемента жорсткості від зварного з'єднання перевищує $b_i^*/2$ або 200 мм, залежно від того, яке з цих значень є найменшим, де b_i^* – ширина пластини між поздовжніми елементами жорсткості.

¹ На розгляді. Етап розроблення на час публікації Європейського стандарту: prEN 1993-1-9:2023.



Умовні позначки:

1 – поперечний елемент жорсткості;

2 – поперечний зварний шов;

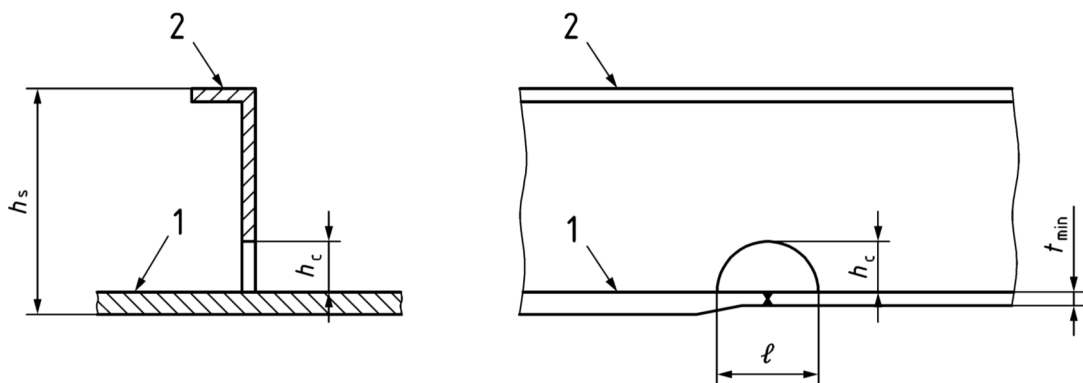
3 – відстань між елементом жорсткості та зварним з'єднанням

Рисунок 11.4 – Пластини, приєднані зварним швом

11.2.4 Вирізи в елементах жорсткості

(1) Вирізи у поздовжніх елементах жорсткості виконують із розмірами, що відповідають рисунку 11.5. Забезпечують висоту вирізу, h_c , що не перевищує:

$$h_c \leq \min \left\{ 40 \text{ мм}; \frac{h_s}{4} \right\}$$



Умовні позначки:

1 – підкріплена пластина;

2 – поздовжній елемент жорсткості

Рисунок 11.5 – Вирізи в поздовжніх елементах жорсткості

(2) Забезпечують довжину ℓ , що не перевищує:

$\ell \leq 6t_{\min}$ для елементів жорсткості зі сталевих штаби, підданих стиску;

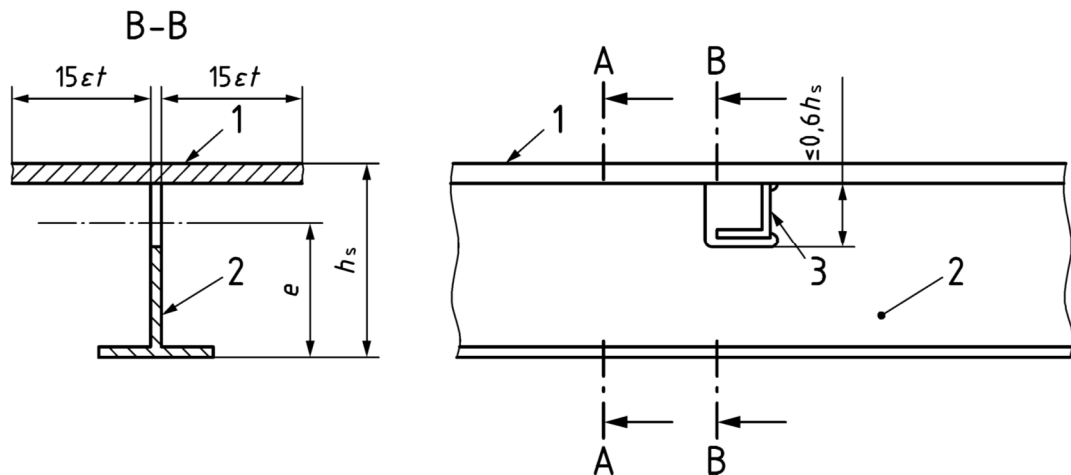
$\ell \leq 8t_{\min}$ для інших елементів жорсткості, підданих стиску;

$\ell \leq 15t_{\min}$ для елементів жорсткості, не підданих стиску,

де $t_{\min}$ – найменше зі значень товщини пластини.

(3) Граничні значення ℓ , зазначені у (2) для підданих стиску елементів жорсткості, допустимо збільшувати на величину $\sqrt{\sigma_{x,Rd}/\sigma_{x,Ed}}$ за умов $\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}$ та $\ell \leq 15t_{\min}$, де $\sigma_{x,Ed}$ – стискальне напруження в місці розташування вирізу.

(4) Розміри вирізів у поперечних елементах жорсткості дотримують згідно з рисунком 11.6.



Умовні позначки:

- 1 – підкріплена пластина;
- 2 – поперечний елемент жорсткості;
- 3 – поздовжній елемент жорсткості

Рисунок 11.6 – Вирізи в поперечних елементах жорсткості

(5) Переріз бруто стінки, розташованої поряд із вирізом (розріз А-А на рисунку 11.6), розраховують на опір силі зсуву V_{Ed} за формулою:

$$V_{Ed} = \frac{I_{net}}{e} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \frac{\pi}{h_w}, \quad (11.10)$$

де

I_{net} – момент інерції площі перерізу нетто, що охоплює елемент жорсткості за вирахуванням вирізу, а також значення ширини пластини згідно з 11.1 (2) – див. розріз В-В рисунку 11.6;

e – максимальна відстань від нижньої поверхні пластини поясу до нейтральної осі перерізу нетто, див. рисунок 11.6;

h_w – довжина поперечного елемента жорсткості між поясами, або відповідно, між стінками у разі елемента жорсткості стінки, або відповідно, елемента жорсткості поясу.

11.3 Зсув

11.3.1 Жорсткий кінцевий стояк

(1) Жорсткий кінцевий стояк застосовують як несний елемент жорсткості, що сприймає реакцію опори (див. 11.4), його проєктують як коротку балку, розраховану на сприймання поздовжніх мембранних напружень у площині стінки.

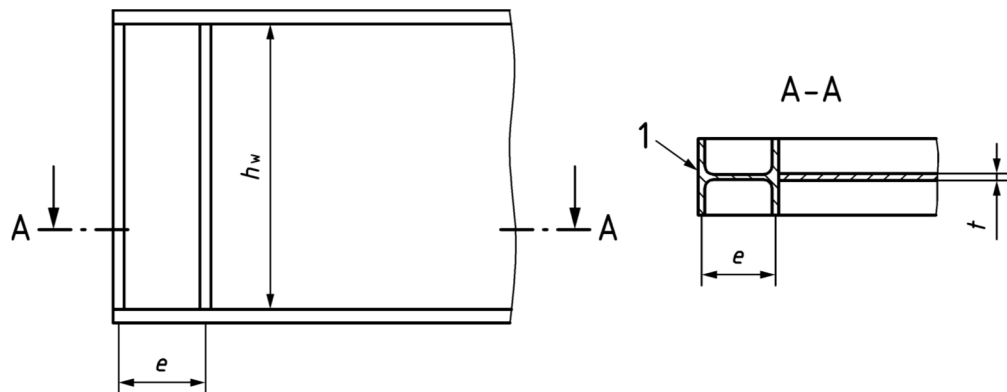
Примітка. Щодо ефектів ексцентриситету внаслідок переміщень шарнірів див. EN 1993-2.

(2) Жорсткий кінцевий стояк складають із двох двобічно встановлених поперечних елементів жорсткості, які утворюють пояси короткої балки завдовжки h_w , див. рисунок 7.1 (с). Ділянка пластини стінки між елементами жорсткості утворює стінку короткої балки. Як альтернативний варіант, жорсткий кінцевий стояк може бути виконано з прокатного профілю, з'єднаного з кінцевою частиною пластини стінки, як показано на рисунку 11.7.

(3) Кожний двобічний елемент жорсткості зі сталеві штаби проєктують так, щоб його площа поперечного перерізу A_e становила щонайменше $4h_w t^2 / e$, де e – відстань між центрами елементів жорсткості, причому значення $e > 0,1h_w$, див. рисунок 11.7. Якщо для кінцевого стояка використовують не сталеву штабу, а прокатний профіль, то забезпечують момент опору його перерізу щонайменше $4h_w t^2$ за згину відносно горизонтальної осі перпендикулярно стінці.

(4) Як альтернативний варіант, кінець балки можна оснастити одним двобічним елементом жорсткості та вертикальним елементом жорсткості, що примикає до опори так, щоб субпанель сприймала максимальне зсувне зусилля у разі проєктування із нежорстким кінцевим стояком.

(5) Окремий елемент жорсткості, з'єднаний із поздовжнім елементом жорсткості з замкненим перерізом, також можна розглядати як жорсткий кінцевий стояк, див. 7.3 (2) і рисунок 7.1 (e).



Умовна позначка:

1 – вставлений профіль

Рисунок 11.7 – Прокатний профіль, що утворює кінцевий стояк

11.3.2 Елементи жорсткості, що працюють як нежорсткі кінцеві стояки

(1) Окремий елемент жорсткості, як показано на рисунку 7.1 (d), розглядають як нежорсткий кінцевий стояк за винятком ситуацій, у яких його з'єднано з поздовжнім елементом жорсткості з замкненим перерізом. Такий окремий елемент жорсткості можна розглядати як несний елемент жорсткості, що сприймає опорну реакцію балки, за дотримання умов 11.4.

11.3.3 Проміжні поперечні елементи жорсткості

(1) Проміжні елементи жорсткості, які застосовують як жорстко сполучені опорні елементи для внутрішніх ділянок стінки, розраховують на міцність і жорсткість.

(2) Якщо використовують гнучкі проміжні поперечні елементи жорсткості, їхню жорсткість враховують в обчисленні k_{τ} згідно з 7.3(7).

(3) Ефективний переріз проміжних елементів жорсткості, застосовуваних як жорстко сполучені опорні елементи для стінок, розраховують так, щоб мінімальне значення моменту інерції площі I_{st} задовольняло такий критерій:

$$I_{st} \geq \begin{cases} 1,5 \frac{h_w^3 t^3}{a^2} & \text{за умови } \frac{a}{h_w} < \sqrt{2} \\ 0,75 h_w t^3 & \text{за умови } \frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (11.11)$$

(4) Проміжні жорстко сполучені елементи жорсткості можна розрахувати на осьове зусилля $N_{st,Ed}$, застосовуючи формулу (11.12), згідно з 11.2.1(3) та (4). У разі варіативності зсувних зусиль перевіряння виконують щодо зсувного зусилля на відстані $0,5h_w$ від кромки панелі, де виникає найбільше зсувне зусилля.

$$N_{st,Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{(\bar{\lambda}_w)^2} \frac{h_w t f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (11.12)$$

11.3.4 Поздовжні елементи жорсткості

(1) Якщо у розрахунку напружень розглядають поздовжні елементи жорсткості, то для них виконують перевіряння поперечного перерізу щодо опору поздовжнім напруженням.

11.3.5 Зварні шви

(1) Зварні шви, якими стінку з'єднано з поясом, можна розрахувати на номінальне значення потоку зсувних зусиль V_{Ed}/h_w , якщо V_{Ed} не перевищує $\chi_w f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$. У разі більших значень V_{Ed}

зварний шов між поясами та стінками розраховують на потік зсувних зусиль, що становить $\eta f_{yw} t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$.

(2) У всіх інших ситуаціях зварні шви розраховують на передавання зусиль уздовж і впоперек зварних швів, які містять переріз, залежно від методу розрахунку (пружного чи пластичного) та з урахуванням ефектів другого порядку.

11.4 Поперечні навантаги

(1) Опір поперечного елемента жорсткості щодо втрати стійкості з площини за умов дії поперечних навантаг і стискальних зусиль, що виникають унаслідок зсувного навантаження і за відсутності сил відхилення, як зазначено в 11.2, можна визначити згідно з 8.3.3 або 8.3.4 EN 1993-1-1:2022, використовуючи криву втрати стійкості c . Якщо припускають защемлення обох кінців від поперечних переміщень, то застосовують розрахункову довжину ℓ , яка становить щонайменше $0,75h_w$. Більше значення ℓ застосовують у ситуації, у якій забезпечено менше защемлення кінців. Якщо елементи жорсткості мають вирізи на підданому навантазі кінці, то перевіряння опору поперечного перерізу виконують на цьому кінці.

(2) Якщо використовують однобічно встановлені чи інші асиметричні поперечні елементи жорсткості, то спричинений цим ексцентриситет враховують у разі застосування положень 8.3.3 або 8.3.4 EN 1993-1-1:2022. Якщо згідно з припущенням поперечні елементи жорсткості забезпечуватимуть бічне обмеження від переміщень підданого стиску поясу, то їх проєктують із дотриманням критеріїв щодо жорсткості й міцності у ситуації втрати стійкості конструкції за поперечно-крутильною формою.

12 МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЗА ПРИВЕДЕНИМ НАПРУЖЕННЯМ

12.1 Загальні положення

(1) Поданий у цьому розділі метод є альтернативним щодо методу розрахунку з застосуванням ефективної ширини, визначеному в розділах 6–9. Його можна застосовувати до непідкріплених чи підкріплених панелей.

Примітка. Цей метод може бути використано для ширшого діапазону граничних умов, геометричних параметрів та умов навантаження порівняно з описаними в розділах 6–9. Застосування цього методу ґрунтується на припущенні, що граничні напруження найслабшої частини поперечного перерізу визначають опір усього поперечного перерізу.

(2) Метод розрахунку за приведеним напруженням не варто використовувати у разі таких поперечних перерізів, як наприклад, U-подібні профілі (швелери) чи гнуті навколо своєї слабкої осі H-подібні профілі (широкополичні двотаври), для яких застосування методу розрахунку за ефективною шириною призведе до відповідного зміщення центру ваги, що призведе до модифікації коефіцієнта напружень, ψ , у підданих стиску елементах зі звисом (однобічним обпиранням).

(3) Проєктування елементів жорсткості та деталювання пластинчастих (елементів) панелей виконують згідно з розділом 11.

(4) Опір пластини визначають у всьому відповідному полі напружень, це означає, що у разі перевіряння згідно з 12.2, а також для розрахунку гнучкості згідно з 12.3 напруження $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ та τ_{Ed} розглядають як такі, що діють разом.

(5) Пластини з елементами жорсткості перевіряють щодо опору загальній втраті стійкості підкріпленої панелі та щодо опору місцевій втраті стійкості різних субпанелей між елементами жорсткості, див. 12.2.

12.2 Перевіряння опору втраті стійкості

(1) У межах усього поперечного перерізу кожної пластини та субпанелі дотримують умов, зазначених у формулах (12.1)–(12.4) для окремих та сумісних дій:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} ; \quad (12.1)$$

$$\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} ; \quad (12.2)$$

$$\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}\sqrt{3}} ; \quad (12.3)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right)^2} - \rho_v \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\rho_{c,x}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\rho_{c,z}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w}\right)^2 \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (12.4)$$

У цих формулах:

$\rho_v = \rho_{c,x}\rho_{c,z}$, якщо обидва напруження $\sigma_{x,Ed}$ та $\sigma_{z,Ed}$ стискальні;

$\rho_v = 1/(\rho_{c,x}\rho_{c,z})$ в інших ситуаціях;

$\rho_{c,x}$, $\rho_{c,z}$, χ_w – понижувальні коефіцієнти, що ґрунтуються на відповідній гнучкості пластини, див. 12.4.

У разі перевіряння за формулою (12.4) враховують розтягувальні напруження.

Примітка 1. Стискальні напруження $\sigma_{x,Ed}$ та $\sigma_{z,Ed}$ застосовують із додатним знаком.

Примітка 2. У блок-схемі на рисунку 12.2 у зведеному вигляді подано загальну процедуру, якої дотримують, застосовуючи метод розрахунку за приведеним напруженням.

(2) Як альтернатива щодо формули (12.4), якщо всі пластини з поперечним перерізом класу 4 не підкріплені та обпираються поза межами своєї площини вздовж усіх чотирьох кромek, то перевіряння параметрів безпеки може ґрунтуватися на перевірному розрахунку

граничного напруження, що визначають із застосуванням еквівалентної ефективної площі перерізів.

У цьому разі можна використати такий метод: товщину кожної пластини класу 4 (поясів балок із коробчастого профілю, стінки) у поперечному перерізі зменшують, застосовуючи до кожної з них окремо понижувальний коефіцієнт $\rho_n = \min\{\rho_{c,x}; \rho_{c,z}; \chi_w\}$, як зазначено в 12.4. У підсумку буде отримано значення ефективної товщини, що надаватиме змогу визначити ефективні властивості поперечного перерізу (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff} тощо).

Після цього остаточне перевіряння щодо втрати стійкості виконують відповідно до результатів перевірного розрахунку еквівалентного напруження згідно з формулою (12.5):

$$\sqrt{\sigma_{x,\text{eff},\text{Ed}}^2 + \sigma_{z,\text{eff},\text{Ed}}^2 - \rho_V \sigma_{x,\text{eff},\text{Ed}} \sigma_{z,\text{eff},\text{Ed}} + 3\tau_{\text{eff},\text{Ed}}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (12.5)$$

де

$\rho_V = \rho_n^2$, якщо обидва напруження $\sigma_{x,\text{eff},\text{Ed}}$ та $\sigma_{z,\text{eff},\text{Ed}}$ стискальні;

$\rho_V = 1$ в інших ситуаціях;

$\sigma_{x,\text{eff},\text{Ed}}$, $\sigma_{z,\text{eff},\text{Ed}}$ та $\tau_{\text{eff},\text{Ed}}$ — компоненти поля напружень, що діють у граничному стані за несною здатністю, визначені із застосуванням властивостей ефективного поперечного перерізу.

Примітка. Застосування цього методу може призвести до відповідного зміщення, e_N , центру ваги ефективного поперечного перерізу. У разі поперечних перерізів, які піддано осьовому стиску N_{Ed} , це спричинятиме виникнення додаткового моменту $\Delta M_{\text{Ed}} = e_N N_{\text{Ed}}$, див. 6.3(3).

(3) Перевіряння щодо втрати стійкості пластини прямокутної підкріпленої двобічно обпертої панелі згідно з 12.2(1) можна виконати, застосовуючи максимальні значення напружень на відстані $0,4a$ чи $0,5b$ (див. розріз А-А на рисунку 12.1) від кінця панелі.

(4) Перевіряння щодо втрати стійкості пластини прямокутної субпанелі можна виконати, застосовуючи максимальні значення напружень на відстані $0,4b_{loc}$ (див. розріз В-В на рисунку 12.1) від кінця панелі.

(5) Крім того, перевіряння опору поперечного перерізу бруто у пружній стадії виконують на кінці кожної панелі (див. розріз С-С на рисунку 12.1), застосовуючи положення EN 1993-1-1.

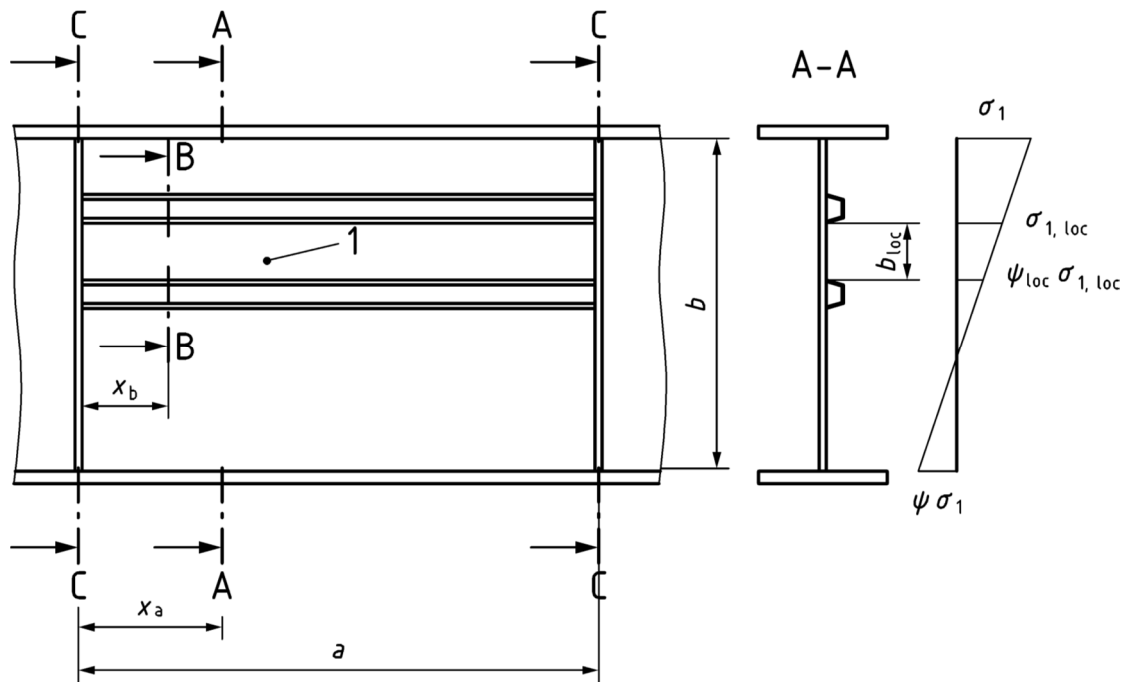


Рисунок 12.1 – Застосування методу розрахунку за приведеним напруженням до підкріплених панелей

12.3 Гнучкість пластини

(1) Гнучкість пластини $\bar{\lambda}_p$ отримують з розрахунку загальної чи місцевої втрати стійкості за формулою (12.6):

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}}, \quad (12.6)$$

де

$\alpha_{ult,k}$ – коефіцієнт динамічності навантаження для врахування розрахункових навантаж, пов'язаних із досягненням характеристичного

значення опору в найбільш критичній точці відповідної панелі чи субпанелі в поперечному перерізі, що розглядають, див. (2).

Примітка. Найбільш критична точка відповідає досягнутому найменшому з можливих значенню $\alpha_{ult,k}$.

α_{cr} — коефіцієнт динамічності навантаження для врахування розрахункових навантаж, пов'язаних із розглядуваною формою критичної втрати стійкості в пружній стадії у всьому відповідному полі напружень, див. (3).

(2) Під час визначення $\alpha_{ult,k}$ для оцінювання опору можна застосувати до текучості зазначений нижче критерій:

$$\alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2}}, \quad (12.7)$$

де

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ та τ_{Ed} — компоненти поля напружень підкріпленої панелі чи окремої субпанелі на відповідних ділянках розглядуваних перерізів, визначені із застосуванням положень (3) або (4), в умовах граничного стану за несною здатністю.

Примітка. Формулу (12.7) застосовують за припущення, що опору буде досягнуто в ситуації, у якій текучість виникатиме без втрати стійкості пластини.

(3) Коефіцієнт динамічності навантаження α_{cr} можна визначити з діаграм втрати стійкості або методом комп'ютерного моделювання. Якщо значень α_{cr} для усього поля напружень немає і використовують лише значення $\alpha_{cr,i}$ для різних компонентів поля напружень $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$ та τ_{Ed} , то значення α_{cr} можна визначити за формулою:

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{cr,z}} + \sqrt{\left(\frac{1+\psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1+\psi_z}{4\alpha_{cr,z}}\right)^2 + \frac{1-\psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1-\psi_z}{2\alpha_{cr,z}^2} + \frac{1}{\alpha_{cr,\tau}^2}}}, \quad (12.8)$$

де

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}} ;$$

$$\alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}} ;$$

$$\alpha_{cr,\tau} = \frac{\tau_{cr,\tau}}{\tau_{\tau,Ed}} .$$

Визначення критичних напружень $\sigma_{cr,x}$, $\sigma_{cr,z}$, τ_{cr} та коефіцієнтів напружень ψ_x , ψ_z див. у розділах 6 і 7 та на рисунку 12.1.

Формулу (12.8) можна застосовувати в таких ситуаціях:

– у разі непідкріплених пластин або якщо пластини підкріплено симетрично розташованими поздовжніми елементами жорсткості за дотримання умов $-1 \leq \psi_x \leq 1$ та $-1 \leq \psi_z \leq 1$;

– у разі будь-якого іншого типу розташування елементів жорсткості, але тільки якщо коефіцієнти напружень ψ_x та ψ_z дорівнюють 1,0.

У разі обчислення α_{cr} для усього поля напружень підкріплену пластину можна змодельовати як зазначено в 7.3(8), не зменшуючи момент інерції площі перерізу поздовжніх елементів жорсткості.

(4) У разі непідкріплених панелей визначають гнучкість лише однієї пластини. У цій ситуації застосовний коефіцієнт динамічності навантаження α_{cr} відповідатиме першому власному типу коливання (власній моді) пластини. У разі підкріплених панелей обчислюють принаймні множники $\alpha_{cr,local}$ та $\alpha_{cr,global}$, пов'язані відповідно з першою місцевою модою кожної субпанелі та першою загальною власною модою всієї панелі.

12.4 Понижувальні коефіцієнти

(1) Понижувальні коефіцієнти обчислюють, використовуючи одне й те саме значення гнучкості $\bar{\lambda}_p$, щоб визначити індивідуальні

понижувальні коефіцієнти для кожного компонента напружень кожної панелі чи субпанелі:

$\rho_{c,x}$ – величина понижувального коефіцієнта за поздовжніх напружень для урахування втрати стійкості за типом роботи стрижня, якщо застосовно, див. (2);

$\rho_{c,z}$ – величина понижувального коефіцієнта за поперечних напружень для урахування втрати стійкості за типом роботи стрижня, якщо застосовно, див. (3);

χ_w – величина понижувального коефіцієнта за зсувних напружень, див. (4).

(2) Значення понижувального коефіцієнта $\rho_{c,x}$ для врахування втрати стійкості за поздовжніх напружень визначають згідно з 6.6.1 або за кривою загальної втрати стійкості, побудованої згідно з (5). Якщо в обчисленні α_{cr} враховують крутильну жорсткість елементів жорсткості з замкненим перерізом і якщо відношення розмірів сторін a/b дорівнює чи перевищує 2, то допустимо лише застосування кривої загальної втрати стійкості згідно з (5).

(3) Значення понижувального коефіцієнта $\rho_{c,z}$ для врахування втрати стійкості за поперечних напружень визначають згідно з 6.6.1, причому зазначений у 6.4.1(2) понижувальний коефіцієнт втрати стійкості пластини замінюють на визначений за кривою втрати стійкості згідно з (5). З міркувань узгодженості, положення розділу 8 не застосовують.

(4) Значення понижувального коефіцієнта χ_w для врахування втрати стійкості за зсувних напружень визначають згідно з 7.3(1) або за кривою загальної втрати стійкості, побудованою згідно з (5).

(5) Понижувальний коефіцієнт, застосовуваний згідно з (3) та який можна застосувати згідно з (2) та (4), обчислюють так:

$$\rho = \begin{cases} 1,0 & \text{за умови } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_{p0} \\ \frac{1}{\varphi_p + \sqrt{\varphi_p^2 - \bar{\lambda}_p}} & \text{за умови } \bar{\lambda}_p > \bar{\lambda}_{p0} \end{cases} \quad (12.9)$$

де

$$\varphi_p = \frac{1}{2} (1 + \alpha_p (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p0}) + \bar{\lambda}_p);$$

$\bar{\lambda}_p$ – визначають за формулою (12.6);

Значення $\bar{\lambda}_{p0}$ та α_p подано в таблиці 12.1.

Примітка. Ці значення відповідають еквівалентній геометричній недосконалості, що визначають за формулою:

$$e_0 = \alpha_p (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p0}) \frac{t}{6} \frac{1 - \frac{\rho \bar{\lambda}_p}{\gamma_{M1}}}{1 - \rho \bar{\lambda}_p} \quad (12.10)$$

Таблиця 12.1 – Значення $\bar{\lambda}_{p0}$ та α_p

Виріб	Переважає форма втрати стійкості	α_p	$\bar{\lambda}_{p0}$
Гарячекатаний	за поздовжнього напруження, якщо $\psi \geq 0$	0,13	0,70
	за поздовжнього напруження, якщо $\psi < 0$		0,80
	за зсуву		
	за поперечного напруження		
Зварний чи холодноформований	за поздовжнього напруження, якщо $\psi \geq 0$	0,34	0,70
	за поздовжнього напруження, якщо $\psi < 0$		0,80
	за зсуву		
	за поперечного напруження		

(6) Для визначення понижувальних коефіцієнтів $\rho_{c,x}$ та $\rho_{c,z}$ згідно з 6.6.1(1) обчислюють значення χ_c для врахування втрати стійкості за типом роботи стрижня згідно з 6.4.2 чи 6.5.3, відповідно, для непідкріплених і підкріплених панелей в усьому відповідному полі

напружень із використанням одного й того самого значення гнучкості пластини $\bar{\lambda}_p$ згідно з формулою (12.6), як зазначено для обчислення ρ_x та ρ_z . Опісля має бути розраховано ваговий коефіцієнт ξ із застосуванням отриманих для панелі чи субпанелі значень $\sigma_{cr,p}$ та $\sigma_{cr,c}$, враховуваних у разі односпрямованого навантаження (тобто з урахуванням лише $\sigma_{x,Ed}$ чи $\sigma_{z,Ed}$, відповідно).

(7) Для перевіряння на загальну втрату стійкості підкріплених панелей, підданих двовісному стиску, розраховуючи напруження $\sigma_{cr,c}$, що діють у поперечному напрямку, для поздовжніх елементів жорсткості проєктують кінцеві опорні елементи так, щоб вони не були вільно обпертими, хоч це і суперечить тому, що зазначено в 6.5.3 (2) для навантажуваних у поздовжньому напрямку панелей.

(8) У разі поперечного навантаження, що діє лише поблизу однієї кромки (наприклад, у стінках балки під час опускання донизу), враховують ефекти додаткових внутрішніх напружень, спричинених поперечним навантаженням поблизу кромки.

(9) Для розрахунку на місцеву втрату стійкості субпанелей можна застосувати ту саму криву втрати стійкості за типом роботи стрижня, що й для непідкріплених панелей ($\alpha = 0,21$ (крива *a*)). Щоб обчислити $\rho_{c,z}$ для врахування місцевої втрати стійкості елементів жорсткості за поперечних напружень, використовують відповідну криву втрати стійкості за типом роботи стрижня *b* або *c* ($\alpha = 0,34$ (крива *b*) у разі елементів жорсткості з замкненим перерізом та $\alpha = 0,49$ (крива *c*) у разі елементів жорсткості з незамкненим перерізом).

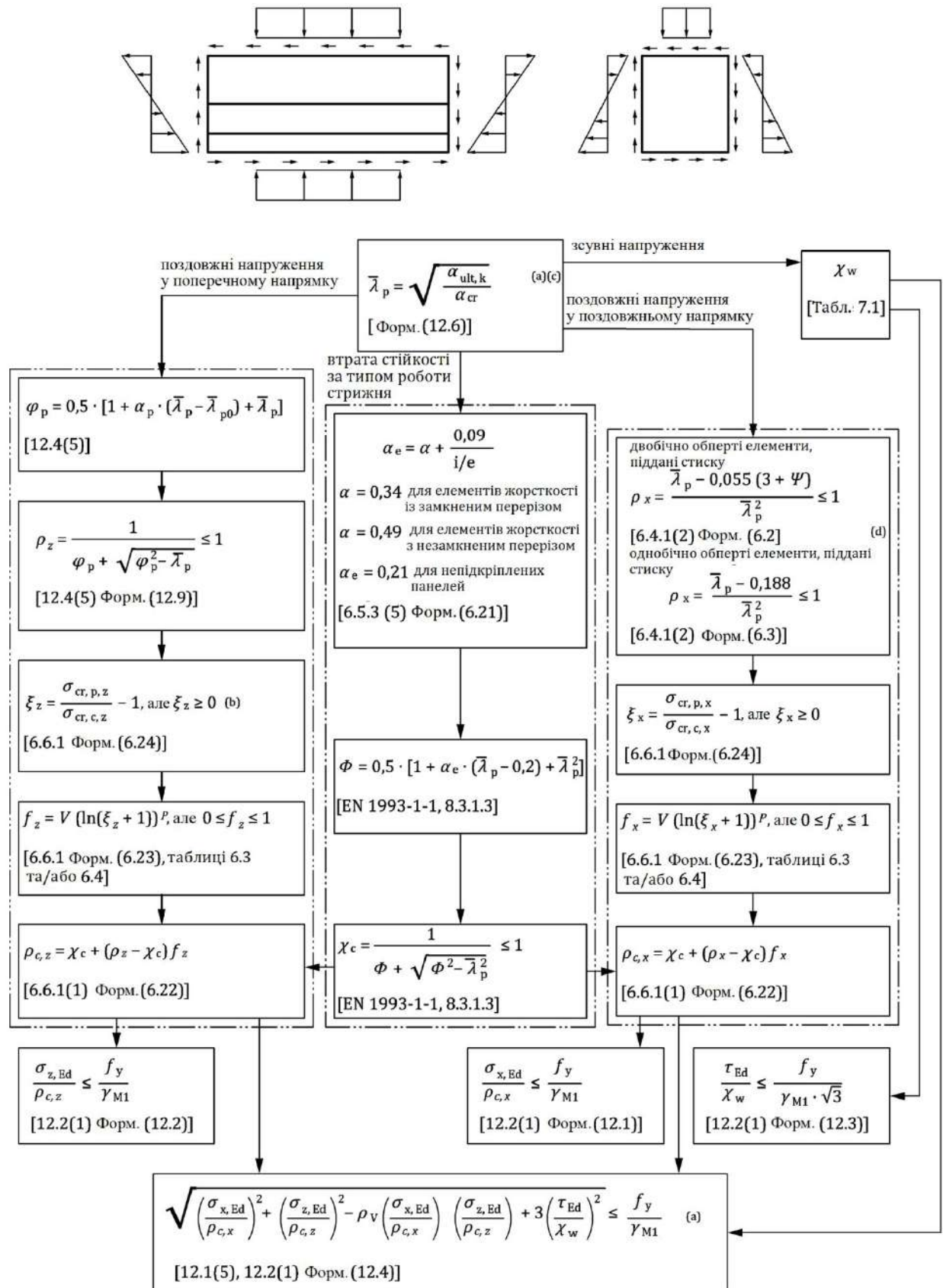


Рисунок 12.2 – Блок-схема застосування методу розрахунку за приведеним напруженням

(а) У разі підкріплених пластин виконують перевіряння щодо загальної втрати стійкості підкріпленої пластини й кожної окремої субпанелі.

(b) У разі двовісного стиску враховують положення 6.5.3 та модифіковану розрахункову довжину згідно з 6.4.2 (5) для визначення поперечних напружень для кожної субпанелі.

(с) У разі двовісного стиску поздовжні елементи жорсткості проєктують із застосуванням моделі балки та розрахунку згідно з теорією другого порядку.

(d) Щодо однобічно обпертих елементів, підданих стиску, див. 12.1 (2).

13 БАЛКИ З ГОФРОВАНИМИ СТІНКАМИ

13.1 Загальні положення

(1) Розділ 13 містить правила проєктування двотаврових балок із трапецієподібним чи синусоїдальним гофруванням стінок, див. рисунок 13.1.

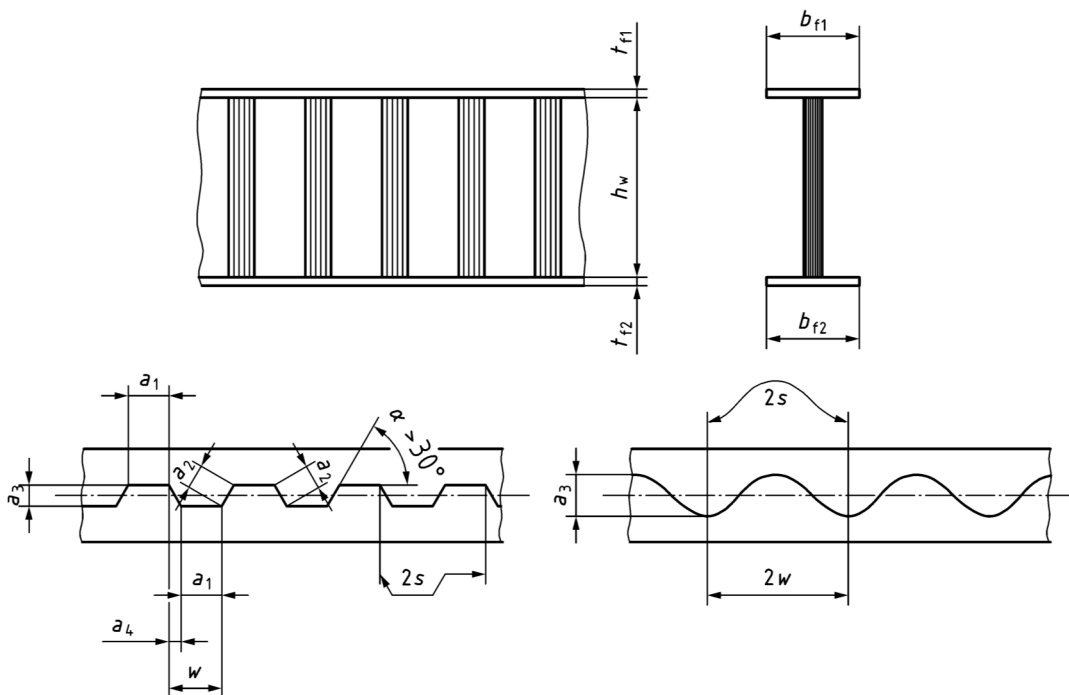


Рисунок 13.1 – Умовні позначки геометричних характеристик

13.2 Граничний стан за несною здатністю

13.2.1 Момент внутрішніх зусиль

(1) Момент внутрішніх зусиль, $M_{y,Rd}$, спричинених згином, визначають як мінімальне значення, обчислене за такою формулою:

$$M_{y,Rd} = f_{yf} \left(h_w + \frac{t_{f1} + t_{f2}}{2} \right) \min \left\{ \frac{b_{f2} t_{f2}}{\gamma_{M0}}; \frac{b_{f1} t_{f1}}{\gamma_{M0}}; \frac{\chi b_{f1} t_{f1}}{\gamma_{M1}} \right\}, \quad (13.1)$$

де

χ – понижувальний коефіцієнт для врахування втрати стійкості з площини, визначений згідно з 8.3 EN 1993-1-1:2022.

(2) Поперечний момент M_z , що виникає внаслідок потоку зсувних зусиль, створює додаткові нормальні напруження $\sigma_x(M_z)$ у поясах, як показано на рисунку 13.2. Цими нормальними напруженнями можна знехтувати в обчисленні $M_{y,Rd}$, але їх ураховують у розподілі напружень у пружній стадії поясів (наприклад, для розрахунку на втомну навантагу). За відсутності детальнішого розрахунку значення M_z можна обчислити за формулою:

$$M_{z,max} = \frac{V}{h_w} \frac{a_3}{2} (2a_1 + a_4), \quad (13.2)$$

де

V – сила зсуву, що діє в розраховуваному поперечному перерізі.

(3) У разі стінок із синусоїдальним гофруванням ефект, спричинений M_z , можна не враховувати.

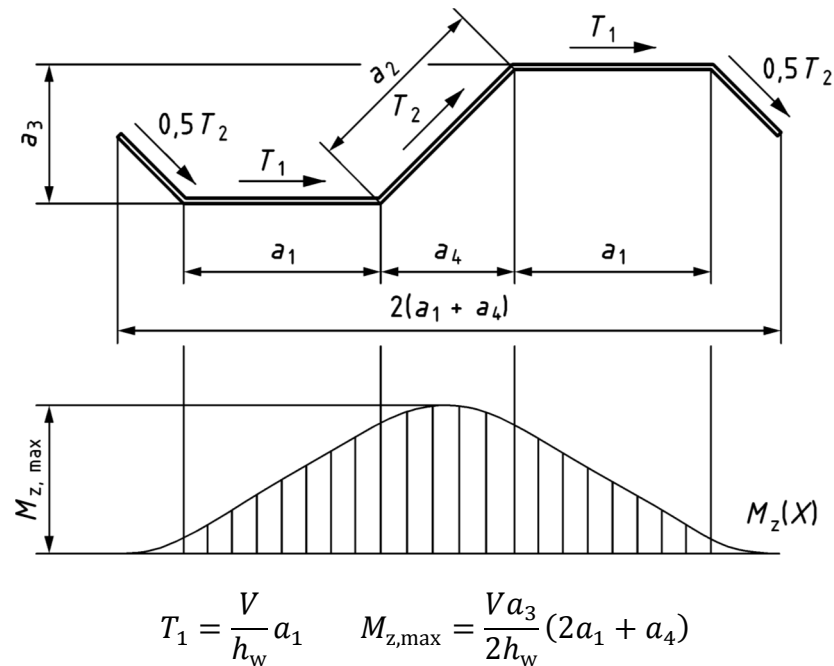


Рисунок 13.2 – Поперечні дії, спричинені передаванням у поясі потоку зсувних зусиль

(4) Ефективну^p площу підданого стиску поясу визначають згідно з 6.4.1(1), застосовуючи більше значення параметра гнучкості $\bar{\lambda}_p$, що визначають згідно з 6.4.1(2). Коефіцієнт втрати стійкості k_σ обчислюють так:

$$k_\sigma = \max\{0,43 + (c/a)^2; 0,6\}, \quad (13.3)$$

де

c – максимальна ширина звису елемента, виміряна від границі внутрішньої поверхні зварного шва до вільної кромки (див. рисунок 13.3);

$$a = a_1 + 2a_4$$

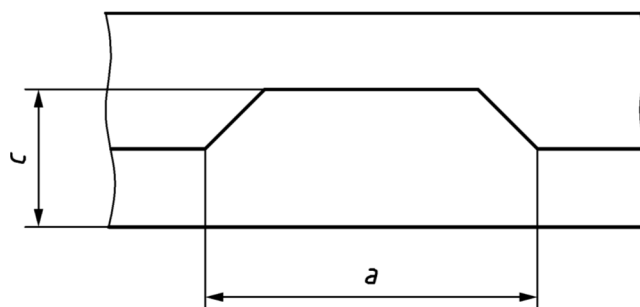


Рисунок 13.3 – Умовні позначення для геометричних характеристик поясу

13.2.2 Опір зсуву

(1) Опір зсуву $V_{bw,Rd}$ визначають за формулою:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_c f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (13.4)$$

де χ_c є меншим зі значень понижувальних коефіцієнтів для врахування місцевої втрати стійкості $\chi_{c,\ell}$ та загально втрати стійкості $\chi_{c,g}$, обчислених згідно з (2) та (3).

(2) Понижувальний коефіцієнт $\chi_{c,\ell}$ для врахування місцевої втрати стійкості обчислюють за формулою:

$$\chi_{c,\ell} = \frac{1,15}{0,9 + \bar{\lambda}_{c,\ell}} \leq 1,0, \quad (13.5)$$

де

$$\bar{\lambda}_{c,\ell} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sqrt{3} \tau_{cr,\ell}}}; \quad (13.6)$$

$$\tau_{cr,\ell} = 4,83E \left(\frac{t_w}{a_{\max}} \right)^2; \quad (13.7)$$

$a_{\max}$ – приймають як більше зі значень: a_1 чи a_2 .

У разі стінок із синусоїдальним гофруванням $\tau_{cr,\ell}$ обчислюють за формулою:

$$\tau_{cr,\ell} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(5,34 + \frac{5}{6} \frac{a_3 s}{h_w t_w} \right) \left(\frac{t_w}{s} \right)^2, \quad (13.8)$$

де s – довжина однієї півхвилі в розгорнутому вигляді, див. 13.1.

(3) Понижувальний коефіцієнт $\chi_{c,g}$ для врахування загальної втрати стійкості визначають за формулою:

$$\chi_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + (\bar{\lambda}_{c,g})^2} \leq 1,0, \quad (13.9)$$

де

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sqrt{3}\tau_{cr,g}}}; \quad (13.10)$$

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_z^3}; \quad (13.11)$$

у цій формулі

$$D_x = \frac{E t_w^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{w}{s};$$

$$D_z = \frac{E I_z}{w};$$

I_z – момент інерції площі одної гофри завдовжки w відносно поздовжньої осі балки;

w – довжина однієї півхвилі, див. рисунок 13.1.

Формула (13.11) дійсна до пластин, які за припущенням є шарнірно обпертими по кромках.

Примітка. Значення s та I_z обчислюють за фактичною формою гофри.

13.2.3 Опір поперечним силам

(1) Розрахунковий опір стінок із трапецієподібним гофруванням визначають згідно з (4) за умови, що підданий стиску пояс є відповідно защемленим від переміщень у поперечному напрямку.

(2) Метод розрахунку застосовують щодо ситуації, у якій навантага, прикладена через пояс, утримується завдяки зсувним зусиллям у стінці, див. рисунок 13.4.

(3) У разі балок із похилими стінками внутрішні зусилля, які має бути враховано, розглядають як складники зовнішньої навантаги в площині стінки.

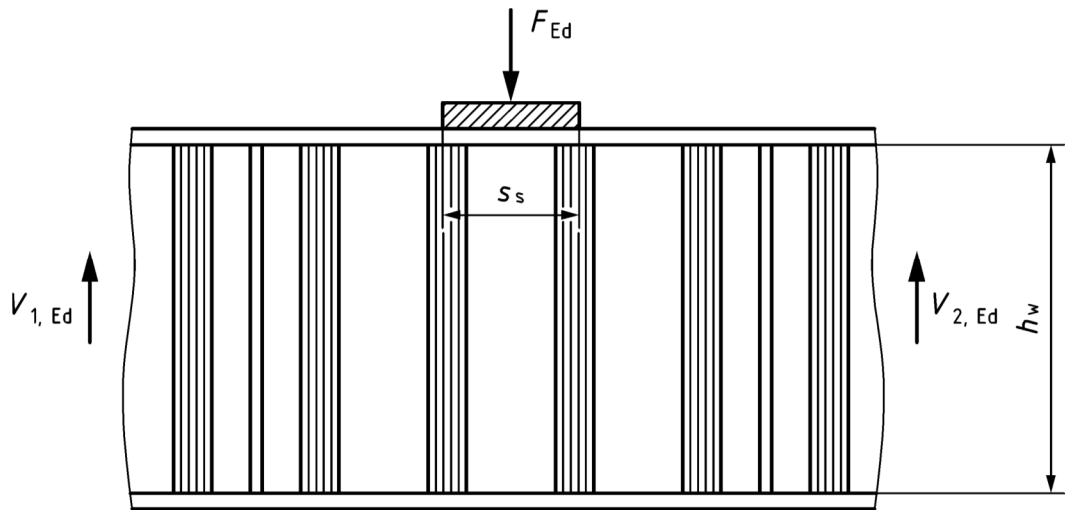


Рисунок 13.4 – Тип навантаження

(4) Розрахунковий опір місцевій втраті стійкості стінки із трапецієподібним гофруванням за умов дії поперечної сили визначають за формулою:

$$F_{Rd} = \frac{\chi k_{\alpha} s_s t_w f_{yw}}{1,20 \gamma_{M1}}, \quad (13.12)$$

де

t_w – товщина стінки;

f_{yw} – границя текучості стінки;

s_s – довжина прикладання навантаги;

k_{α} – коефіцієнт модифікації для врахування кута гофрування, який обчислюють за формулою:

$$k_{\alpha} = \frac{a_1 + a_2}{a_1 + a_4} \quad (\text{див. рисунок 13.1}); \quad (13.13)$$

χ – понижувальний коефіцієнт для врахування місцевої втрати стійкості, який обчислюють за формулою:

$$\chi = \begin{cases} 1,0 & \text{за умови } \bar{\lambda}_p \leq 1,27 \\ \frac{1,9}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,8}{(\bar{\lambda}_p)^2} & \text{за умови } \bar{\lambda}_p > 1,27 \end{cases} \quad (13.14)$$

де

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sigma_{cr}}}; \quad (13.15)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_w}{a_i} \right)^2; \quad (13.16)$$

$$k_\sigma = 1,11; \quad (13.17)$$

a_i – довжина навантажуваної складки. Якщо навантаженню піддано багато складок, то беруть найбільшу довжину складки (a_1 чи a_2).

(5) Нижче подано метод розрахунку, який застосовують до балок, у яких довжина складки a_i становить більше за $a_{i,max}$, що обчислюють за формулою (13.18), де t_w зазначають у мм.

$$a_{i,max} = \left(\frac{h_w}{t_w} + 260 \right) \frac{t_w}{11,5} \quad (13.18)$$

Цей метод розрахунку застосовують лише до стінок із трапецієподібним гофруванням.

13.2.4 Взаємодія зсувного зусилля та згинального моменту

(1) Якщо балка, що має стінку з трапецієподібним гофруванням, піддана дії згинального моменту та зсувного зусилля, то розрахунковий опір згинальному моменту не потрібно зменшувати, щоб врахувати зсувне зусилля, незалежно від застосовного до зсуву коефіцієнта використання.

13.2.5 Взаємодія поперечного зусилля, згинального моменту і зсувного зусилля

(1) Якщо балка, що має стінку з трапецієподібним гофруванням, піддана зосередженій поперечній силі, що діє на пояс, підданий стиску разом зі згином і зсувом, то перевіряння опору виконують за допомогою формул (13.1), (13.4), (13.12) та поданої нижче формули взаємодії:

$$\max \left\{ \frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \right)^{2,9} ; \left(\frac{V_{Ed} - 0,5F_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \right)^{1,2} + \left(\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \right)^{1,2} \right\} \leq 1,0 , \quad (13.19)$$

де

M_{Ed} – розрахунковий згинальний момент;

V_{Ed} – розрахункова зсувна сила;

F_{Ed} – розрахункова поперечна сила;

$M_{y,Rd}$ – момент внутрішніх зусиль унаслідок згину, див. 13.2.1;

$V_{bw,Rd}$ – опір зсуву гофрованої стінки, див. 13.2.2;

F_{Rd} – розрахунковий опір місцевій втраті стійкості за дії поперечних сил, див. 13.2.3.

13.2.6 Вимоги щодо кінцевих елементів жорсткості

(1) Опорні елементи жорсткості проектують згідно з розділом 11.

ДОДАТОК А

(довідковий)

РОЗРАХУНОК КРИТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ДЛЯ ПІДКРІПЛЕНИХ ПЛАСТИН

А.1 Використання цього довідкового додатка

(1) Цей додаток містить додаткові рекомендації щодо розрахунку критичного напруження за втрати стійкості пластин у пружній стадії, застосовні до підкріплених пластин, підданих поздовжнім напруженням, напруженням зсуву та місцевому розподіленому навантаженню.

Примітка. Цей довідковий додаток містить відкриті для національного вибору параметри, щодо яких відповідні дані має бути подано в Національному додатку. Якщо ж Національний додаток не містить таких даних, може бути застосовано положення цього довідкового додатка.

А.2 Сфера застосування та область застосовних значень

(1) У цьому довідковому додатку подано процедури розрахунку, які можна використовувати для обчислення критичного напруження за втрати стійкості пластини в пружній стадії, що застосовують до підкріплених пластин відповідно до вимог щодо проєктування, зазначених у розділах 6, 7 та 8. Зазначені у цьому додатку процедури є альтернативними завдяки використанню діаграм або числових моделей.

А.3 Еквівалентна ортотропна пластина, призначена для розрахунку пластин із щонайменше трьома поздовжніми елементами жорсткості

(1) Пластини із щонайменше трьома поздовжніми елементами жорсткості можна розглядати як еквівалентні ортотропні пластини.

(2) Критичне напруження за втрати стійкості в пружній стадії еквівалентної ортотропної пластини можна визначити за формулою (6.5), де k_σ – коефіцієнт втрати стійкості $k_{\sigma,p}$ згідно з теорією ортотропних пластин, які підкріплено розподіленими по всій пластині елементами жорсткості, а b – визначають згідно з рисунком 6.9.

(4) У разі підкріплених пластин із щонайменше трьома рівновіддаленими поздовжніми елементами жорсткості коефіцієнт втрати стійкості пластини $k_{\sigma,p}$ (загальна втрата стійкості підкріпленої панелі) можна обчислити як наближене значення за формулою:

$$k_{\sigma,p} = \begin{cases} 2 \frac{\gamma - 1 + \left(1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2\right)^2}{(1 + \psi)(1 + \delta) \left(\frac{a}{b}\right)^2} & \text{за умови } \frac{a}{b} \leq \sqrt[4]{\gamma} \\ 4 \frac{1 + \sqrt{\gamma}}{(1 + \psi)(1 + \delta)} & \text{за умови } \frac{a}{b} > \sqrt[4]{\gamma} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

де

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 \geq 0,5 ;$$

значення a/b приймають щонайнижче 0,5, причому a та b визначають, як показано на рисунку 6.9, а γ та δ визначають згідно з 6.6.2(2).

A.4 Еквівалентна ортотропна пластина, призначена для розрахунку пластин з одним чи двома поздовжніми елементами жорсткості

(1) Якщо підкріплена пластина має лише один поздовжній елемент жорсткості в підданій стиску зоні, то викладену в А.3 процедуру можна спростити до розгляду умовного окремо розташованого стиснутого стрижня, обпертого на пружну основу, що відображатиме спричинений у пластині ефект у напрямку перпендикулярно до цього стрижня. Пружне критичне напруження еквівалентного стрижня може бути визначено з (A.2) або за

використання числових моделей, які ґрунтуються на тих самих припущеннях.

(2) Геометричні властивості еквівалентного стрижня $A_{sl,1}$, $I_{sl,1}$ визначено в 6.6.2(4).

(3) Якщо підкріплена пластина має два поздовжні елементи жорсткості в підданій стиску зоні, то можна використати описану в (1) процедуру розрахунку стосовно одного елемента жорсткості, розглядаючи три ситуації, зазначені на рисунку 6.10. У кожній з цих трьох ситуацій відповідне значення $\sigma_{cr,p}$ обчислюють, застосовуючи $b_1 = b_1^*$ та $b_2 = b_2^*$, а також $b = B^*$.

(4) У ситуації, у якій розглядають пластину, підкріплену одним поздовжнім елементом жорсткості, розташованим у підданій стиску зоні, критичне напруження за втрати стійкості пластини у пружній стадії, застосовуване до елемента жорсткості, можна розрахувати, приймаючи за припущенням спрощену модель, у якій розглядають стрижень, защемлений від переміщень пластиною, а елементи жорсткості в підданій розтягу зоні не враховують. За поданою нижче формулою обчислюють такі значення $\sigma_{cr,p,sl}$:

$$\sigma_{cr,p,sl} = \begin{cases} \frac{1,05E}{A_{sl,1}} \frac{\sqrt{I_{sl,1} b t^3}}{b_1 b_2} & \text{за умови } a \geq a_c \\ \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} + \frac{E a^2 b t^3}{4\pi^2 (1 - \nu^2) A_{sl,1} b_1^2 b_2^2} & \text{за умови } a < a_c \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

де

$A_{sl,1}$, $I_{sl,1}$, t , a , a_c , b , b_1 та b_2 визначають згідно з 6.6.2(3)–6.6.2(5).

Примітка. Щодо визначення $\sigma_{cr,p}$ див. рисунок 6.9.

(5) У ситуації, у якій розглядають пластину, підкріплену двома поздовжніми елементами жорсткості, розташованими в підданій стиску зоні, критичне напруження за втрати стійкості пластини у пружній стадії приймають як найменше зі значень, обчислених у трьох ситуаціях за

формулою (A.2), із застосуванням $b_1 = b_1^*$, $b_2 = b_2^*$ та $b = B^*$, а також b_1^* , b_2^* та B^* , визначених згідно з рисунком 6.10. Елементи жорсткості в підданій розтягу зоні в обчисленні не враховують.

A.5 Коефіцієнти втрати стійкості за зсуву

(1) У разі пластин із жорстко сполученими поперечними елементами жорсткості та без поздовжніх елементів жорсткості чи з більш ніж двома поздовжніми елементами жорсткості коефіцієнт втрати стійкості за зсуву k_τ можна обчислити за такою формулою:

$$k_\tau = \begin{cases} 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau,sl} & \text{за умови } \frac{a}{h_w} \geq 1 \\ 4,00 + 5,34 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + k_{\tau,sl} & \text{за умови } \frac{a}{h_w} < 1 \end{cases} \quad (A.3)$$

де

$$k_{\tau,sl} = \max \left\{ 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \left(\frac{\beta_{sl} I_{sl}}{h_w t^3} \right)^{0,75}; \frac{2,1}{t} \left(\frac{\beta_{sl} I_{sl}}{h_w} \right)^{1/3} \right\};$$

a – відстань між поперечними елементами жорсткості (див. рисунок 7.3);

I_{sl} – сума значень моменту інерції площі всіх окремих поздовжніх елементів жорсткості відносно осі $z-z$, див. рисунок 7.3;

β_{sl} – дорівнює 1,0 у разі поздовжніх елементів жорсткості з незамкненим перерізом, а в разі повздовжніх елементів жорсткості з замкненим перерізом дорівнює 3,0.

Для конфігурацій без поздовжніх елементів жорсткості приймають $k_{\tau,sl}$, що дорівнює нулю.

Формулу (A.3) не допустимо застосовувати у разі проміжних нежорстко сполучених поперечних елементів жорсткості.

Формула (А.3) дійсна також у разі панелей із рівномірно розташованими поздовжніми елементами жорсткості, які мають однакову згинальну жорсткість із площини.

(2) Формулу (А.3) застосовують також до пластин з одним чи двома поздовжніми елементами жорсткості, якщо співвідношення значень сторін a/h_w більше чи дорівнює 3. У разі пластин з одним чи двома поздовжніми елементами жорсткості та зі співвідношенням сторін a/h_w , що становить менше 3, коефіцієнт втрати стійкості за зсуву можна обчислити за формулою:

$$k_\tau = 4,1 + \left(6,3 + 0,18 \frac{\beta_{sl} I_{sl}}{h_w t^3}\right) \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + 2,2 \left(\frac{\beta_{sl} I_{sl}}{h_w t^3}\right)^{1/3} \quad (\text{А.4})$$

А.6 Коефіцієнт втрати стійкості внаслідок місцевого розподіленого навантаження

(1) Для стінок із поздовжніми елементами жорсткості, які піддано поперечним навантагам відповідно до рисунка 8.1 (а), коефіцієнт втрати стійкості k_F можна обчислити за формулою (А.5):

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + \left(5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21\right) \sqrt{\gamma_s}, \quad (\text{А.5})$$

де

b_1 – висота перерізу підданої навантазі субпанелі, що визначають як розмір у просвіті між навантаженим поясом і елементом жорсткості;

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{sl,1}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left(\frac{a}{h_w}\right)^3 + 210 \left(0,3 - \frac{b_1}{a}\right); \quad (\text{А.6})$$

$I_{sl,1}$ – момент інерції площі елемента жорсткості, розташованого найближче до навантаженого поясу, разом із задіяними у забезпеченні опору частинами стінки, згідно з рисунком 11.1.

Формула (А.6) є дійсною за умов $0,05 \leq b_1/a \leq 0,3$ та $b_1/h_w \leq 0,3$ і за навантаження типу а) згідно з рисунком 8.1.

ДОДАТОК В

(довідковий)

КОНСТРУКЦІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ ЗІ ЗМІННИМ ПЕРЕРІЗОМ

В.1 Використання цього довідкового додатка

(1) Цей додаток містить додаткові рекомендації щодо проєктування конструкційних елементів зі змінним перерізом, застосовні в ситуації взаємозв'язку зусиль втрати стійкості пластини із втратою стійкості за поперечно-крутильною формою.

Примітка. Цей довідковий додаток містить відкриті для національного вибору параметри, щодо яких відповідні дані має бути подано в Національному додатку. Якщо ж Національний додаток не містить таких даних, може бути застосовано положення цього довідкового додатка.

В.2 Сфера застосування та область застосовних значень

(1) У цьому довідковому додатку викладено процедуру проєктування балок і конструкційних елементів, які не відповідають умовам застосування процедур проєктування, поданих у розділах 6–9. У ньому також розглянуто взаємозв'язок між втратою стійкості пластини та втратою стійкості за поперечно-крутильною формою балок, які є потенційно сприйнятливими щодо обох ефектів.

В.3 Загальні положення

(1) Правила розділу 12 застосовують також до стінок конструкційних елементів із непаралельно розташованими поясами під кутом понад $17,5^\circ$, до стінок з отворами звичайними чи збільшеними порівняно з номінальним діаметром, а також до стінок із неортогональними елементами жорсткості за умови, що до процедури розрахунку буде внесено зазначені нижче зміни.

(2) Понижувальні коефіцієнти ρ_x , ρ_z та χ_w за дотримання умови щодо $\bar{\lambda}_p$ завжди обчислюють за формулою (12.9).

(3) Коефіцієнти α_{ult} та α_{crit} для використання у формулі (12.6) можна розрахувати, застосовуючи методи скінченних елементів (FE), див. EN 1993-1-14.

В.4 Зв'язок між втратою стійкості пластини та поперечно-крутильною формою втрати стійкості

(1) Метод, визначений у В.3, можна застосовувати для перевіряння комбінації втрати стійкості пластини та втрати стійкості конструкційних елементів за поперечно-крутильною формою, визначивши α_{ult} та α_{cr} , як подано нижче:

α_{ult} — мінімальне значення коефіцієнта динамічності навантаження, застосовуване до розрахункових навантаг, щоб отримати характеристичне значення опору найбільш критичного поперечного перерізу без урахування будь-якої втрати стійкості пластини та втрати стійкості за поперечно-крутильною формою;

α_{cr} — мінімальне значення коефіцієнта динамічності навантаження, застосовуване до розрахункових навантаг, щоб отримати значення критичного навантаження в пружній стадії конструкційного елемента з урахуванням втрати стійкості пластини та втрати стійкості за поперечно-крутильною формою.

(2) Якщо коефіцієнт α_{cr} використовують для врахування втрати стійкості за поперечно-крутильною формою, то понижувальний коефіцієнт ρ застосовують такий, що дорівнює найменшому значенню, отриманому згідно з 12.4(5), а значення χ_{LT} для врахування втрати стійкості за згинально-крутильною формою обчислюють згідно з 8.3.2.3 EN 1993-1-1:2022.

БІБЛІОГРАФІЯ

Нормативні документи, посилання на які містять положення цього стандарту, сформульовані як рекомендації (тобто за використання дієслова «should»)

Нижче зазначено документи, посилання на які містять положення цього стандарту так, що частина або весь їхній зміст, хоч і не становлять вимог, яких треба суворо дотримувати, але є настійно рекомендованим варіантом чи способом дії згідно з цим стандартом. Відповідно до національного законодавства та/або будь-яких застосовних договірних положень може бути використано/прийнято альтернативні стандарти, якщо це технічно обґрунтовано. У разі датованих посилань застосовують лише наведені видання. У разі недатованих посилань застосовують останнє видання зазначеного в посиланні документа (разом зі змінами).

EN 1993-1-8:2024 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-8: Joints

EN 1993-1-9² Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue

EN 1993-1-14 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 1993-1-8:2024 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-8. Примикання

EN 1993-1-9 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-9. Втома

² На розгляді. Етап розробки на момент публікації Європейського стандарту: prEN 1993-1-9:2023.

EN 1993-1-14 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-14. Проектування із застосуванням розрахунку методом скінченних елементів

Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis

Нормативні документи, посилання на які містять положення цього стандарту, сформульовані як допустимі/дозволені умови (тобто за використання дієслова «may»)

Нижче зазначено документи, посилання на які містять положення цього стандарту так, що частина або весь їхній зміст, хоч і не становить вимог, яких треба суворо дотримувати, але визначають способи дії, допустимі у межах сфери застосування Єврокодів. У разі датованих посилань застосовують лише наведені видання. У разі недатованих посилань застосовують останнє видання зазначеного в посиланні документа (разом зі змінами).

EN 1993-1-3:2024 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-3: Cold-formed members and sheeting

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 1993-1-3:2024 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Холодноформовані елементи та профільовані листи

Нормативні документи, посилання на які містять положення цього стандарту, сформульовані як можливі умови (тобто за використання дієслова «can»), а також примітки

За допомогою посилань на зазначені нижче документи у положеннях та примітках цього стандарту подано довідкову

ДСТУ EN 1993-1-5:20XX

інформацію, сформульовану, наприклад, із застосуванням дієслова «can».

EN 1993-1-7 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-7:
Plate assemblies with elements under transverse loads

EN 1993-2 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 2: Bridges

EN 1993-6 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 6: Crane
supporting structures

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 1993-1-7 Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій.
Частина 1-7. Пластинчасті конструкції, навантажені поза межами
площини

EN 1993-2 Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій.
Частина 2. Мости

EN 1993-6 Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій.
Частина 6. Підкранові конструкції

ДОДАТОК НА

(довідковий)

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

ДСТУ EN 1090-2:2019 (EN 1090-2:2018, IDT) Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 2. Технічні вимоги до сталевих конструкцій

ДСТУ EN 1990:202X (EN 1990:2023, IDT) Єврокод. Основи будівельного та геотехнічного проектування

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-1:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-1. Загальні дії. Питома вага, власна вага, експлуатаційні навантаження для споруд (EN 1991-1-1:2002, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-3:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-3. Загальні дії. Снігові навантаження (EN 1991-1-3:2003, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження (EN 1991-1-4:2005, IDT+NA:2013)

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-5:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-5. Загальні дії. Теплові дії (EN 1991-1-5:2003, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-6:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-6. Загальні дії. Дії під час зведення (EN 1991-1-6:2005, IDT)

ДСТУ EN 1993-1-5:20XX

ДСТУ-Н Б EN 1991-1-7:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи (EN 1991-1-7:2006, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 2. Рухомі навантаження на мости (EN 1991-2:2003, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-3:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 3. Дії викликані кранами та обладнанням (EN 1991-3:2006, IDT)

ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари (EN 1991-4:2006, IDT)

ДСТУ EN 1993-1-1:20XX (EN 1993-1-1:2022, IDT) «Єврокод 3. Проєктування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для будівель

Коди згідно з НК 004 91.010.30; 91.080.13

Ключові слова: втрата стійкості, елемент жорсткості, ефективний переріз, метод скінченних елементів, пластина, проектування, сталеві конструкції