



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ EN 1999-1-3:202__
(EN 1999-1-3:2023)

ЄВРОКОД 9.
ПРОЄКТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Частина 1-3: Конструкції схильні до втоми

(Проект, остаточна редакція)

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
202_

ЗМІСТ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП.....	С. IX
ПЕРЕДМОВА ДО EN 1999-1-3:2023	X
ВСТУП	XII
1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ	1
1.1 Сфера застосування EN 1999-1-3	1
1.2 Припущення	1
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ.....	2
3 ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ПОЗНАКИ.....	2
3.1 Терміни та визначення понять.....	2
3.2 Позначки.....	8
4 ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ	12
4.1 Загальні положення.....	12
4.2 Методи розрахунку на втому	13
4.2.1 Метод безпечного ресурсу (<i>Safe life design; SLD</i>)	13
4.2.2 Метод допустимої пошкоджуваності (<i>Damage tolerant design; DTD</i>).....	14
4.2.3 Метод тестових випробувань на втому.....	14
4.3 Втомлювальне навантаження.....	15
4.3.1 Джерела втомлювального навантаження.....	15
4.3.2 Опис втомлювального навантаження	15
4.3.3 Еквівалентне втомлювальне навантаження	16
4.4 Часткові коефіцієнти втомлювального навантаження	17
4.5 Вимоги до виконання.....	18
4.5.1 Загальні положення.....	18
4.5.2 Класи виконання	18
4.5.3 Технічне завдання на виконання	18
4.5.4 Інструкція з експлуатації.....	19
4.5.5 Інструкція з технічного огляду та обслуговування.....	19
5 МАТЕРІАЛИ, СКЛАДОВІ ВИРОБИ ТА З'ЄДНУВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ.....	20
6 ДОВГОВІЧНІСТЬ.....	20
7 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ.....	21
7.1 Загальний аналіз.....	21
7.1.1 Загальні положення.....	21
7.1.2 Використання балкових елементів	23

7.1.3 Використання мембранних, оболонкових та твердотільних елементів....	24
7.2 Типи напружень	25
7.2.1 Загальні положення.....	25
7.2.2 Номінальні напруження.....	25
7.2.3 Модифіковані номінальні напруження.....	26
7.2.4 Локальні максимуми напружень.....	27
7.3 Визначення напружень.....	28
7.3.1 Визначення номінальних напружень.....	28
7.3.2 Визначення модифікованих номінальних напружень.....	29
7.3.3 Визначення локальних максимумів напружень	30
7.3.4 Орієнтація напружень	31
7.4 Розподіл напружень в зонах виникнення пошкоджень від втоми.....	31
7.4.1 Основний матеріал, зварні шви та механічні з'єднання	31
7.4.2 Куткові та стикові зварні шви з неповним проваром.....	32
7.5 Клейові з'єднання	33
7.6 Ливарні з'єднання	33
7.7 Спектри напружень.....	33
7.8 Розрахунок еквівалентного діапазону напружень для типових моделей втомлювального завантаження	34
7.8.1 Загальні положення.....	34
7.8.2 Розрахункове значення діапазону напружень.....	34
8 ВТОМНА МІЦНІСТЬ ТА КАТЕГОРІЇ ДЕТАЛЕЙ	35
8.1 Категорії деталей.....	35
8.1.1 Загальні положення.....	35
8.1.2 Чинники, що впливають на категорію деталей	35
8.1.3 Деталі конструкцій	36
8.2 Характеристики міцності при втомі.....	37
8.2.1 Класифіковані деталі конструкцій	37
8.2.2 Некласифіковані деталі конструкцій.....	40
8.2.3 Клейові з'єднання.....	40
8.2.4 Визначення базових значень міцності в «гарячих точках»	41
8.3 Вплив середнього напруження	41
8.3.1 Загальні положення.....	41
8.3.2 Основний матеріал і механічні з'єднання.....	41
8.3.3 Зварні з'єднання.....	42

8.3.4 Клейові з'єднання.....	42
8.3.5 Діапазон малоциклової витривалості	42
8.3.6 Визначення кількості циклів для розрахунку R -відношення	42
8.4 Вплив навколишнього середовища	43
8.5 Методи підвищення втомної міцності	44
ДОДАТОК А (нормативний) ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ.....	45
А.1 Застосування цього додатка.....	45
А.2 Сфера та область застосування	45
А.3 Загальні положення.....	45
А.3.1 Вплив втоми на проєктування.....	45
А.3.2 Механізм руйнування	46
А.3.3 Потенційні місця утворення тріщин при втомі.....	46
А.3.4 Умови схильності до втоми	47
А.4 Метод безпечного ресурсу	48
А.4.1 Загальні положення	48
А.4.2 Передумови для розрахунку безпечного ресурсу.....	50
А.4.3 Методологія розрахунку	50
А.4.4 Обчислення кількості циклів.....	53
А.4.5 Визначення спектру напружень	55
А.5 Метод допустимої пошкоджуваності.....	56
А.5.1 Передумови проєктування за допустимою пошкоджуваністю	56
А.5.2 Настанови із застосування методу допустимої пошкоджуваності.....	57
А.5.3 Стратегії перевірок за методом допустимої пошкоджуваності.....	58
ДОДАТОК В (довідковий) НАСТАНОВИ ЩОДО ОЦІНКИ РОЗВИТКУ ТРІЩИН ЗА ДОПОМОГОЮ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ.....	63
В.1 Застосування цього довідкового додатку	63
В.2 Сфера та область застосування	63
В.3 Принципи	64
В.3.1 Розміри дефектів	64
В.3.2 Залежність розвитку тріщин	64
В.4 Характеристики розкриття тріщин A та m	65
В.5 Геометрична функція u	68
В.6 Інтегрування розвитку тріщини.....	69
В.7 Оцінка максимального розміру тріщини a_2	69
ДОДАТОК С (довідковий) МЕТОД ТЕСТОВИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ВТОМУ	77

С.1 Застосування цього довідкового додатку	77
С.2 Сфера та галузь застосування.....	77
С.3 Визначення параметрів діючого навантаження	78
С.3.1 <i>Нерухомі конструкції під дією механічного впливу</i>	78
С.3.2 <i>Нерухомі конструкції під впливом навколишнього середовища</i>	79
С.3.3 <i>Рухомі конструкції</i>	80
С.4 Отримання даних по напруженням	81
С.4.1 <i>Дані випробувань елементів конструкцій</i>	81
С.4.2 <i>Дані випробувань конструкцій</i>	81
С.4.3 <i>Верифікація історії напружень</i>	82
С.5 Отримання даних щодо витривалості.....	82
С.5.1 <i>Випробування окремих компонентів</i>	82
С.5.2 <i>Натурні випробування</i>	84
С.5.3 <i>Критерій прийнятності</i>	85
С.6 Дані про зростання тріщин	89
С.7 Звітність	89
ДОДАТОК D (довідковий) АНАЛІЗ НАПРУЖЕНЬ	91
D.1 Застосування цього довідкового додатку	91
D.2 Сфера та область застосування.....	91
D.3 Застосування скінченних елементів для аналізу втоми	91
D.3.1 <i>Типи елементів</i>	91
D.3.1.1 <i>Балкові елементи</i>	91
D.3.1.2 <i>Мембранні елементи</i>	92
D.3.1.3 <i>Тонкостінні оболонкові елементи</i>	92
D.3.1.4 <i>Товстостінні оболонкові елементи</i>	93
D.3.1.5 <i>Елементи для моделювання плоских деформацій</i>	93
D.3.2 <i>Додаткові вказівки щодо використання скінченних елементів</i>	93
D.4 Коефіцієнти концентрації напружень.....	94
D.5 Обмеження втоми при повторній втраті місцевої стійкості	95
ДОДАТОК E (довідковий) КЛЕЙОВІ З'ЄДНАННЯ	97
E.1 Застосування цього довідкового додатку	97
E.2 Сфера та область застосування	97
ДОДАТОК F (довідковий) ДІАПАЗОН МАЛОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ	101
F.1 Застосування цього довідкового додатку	101
F.2 Сфера та область застосування	101

F.3 Модифікація кривих міцності при втомі.....	101
F.4 Дані випробувань.....	102
ДОДАТОК G (довідковий) ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ <i>R</i>	
G.1 Використання цього довідкового додатку	104
G.2 Сфера та галузь застосування	104
G.3 Підвищення міцності при втомі	104
G.4 Випадки підвищення міцності.....	105
G.4.1 <i>Випадок 1</i>	105
G.4.2 <i>Випадок 2</i>	106
Примітка. Див. також таблицю G.2 та рисунок G.1.....	106
G.4.3 <i>Випадок 3</i>	106
ДОДАТОК H (довідковий) ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ	
H.1 Застосування цього довідкового додатку	107
H.2 Сфера та область застосування.....	107
H.3 Механічна обробка або шліфування.....	108
H.4 Наплавлення за допомогою дугового або плазмового зварювання.....	109
H.5 Нагартування.....	110
ДОДАТОК I (довідковий) ЛИТТЯ.....	
I.1 Застосування цього довідкового додатку.....	111
I.2 Сфера та область застосування	111
I.3 Дані про втомну міцність	111
I.3.1 <i>Ливарний матеріал</i>	111
I.3.2 <i>Зварний матеріал</i>	112
I.3.3 <i>Механічно з'єднані литі елементи</i>	112
I.3.3.1 Болтові з'єднання	112
I.3.3.2 Штифтові з'єднання	113
I.3.4 <i>Клейове з'єднання литих елементів</i>	113
I.4 Вимоги до якості	113
ДОДАТОК J (довідковий) ТАБЛИЦІ КАТЕГОРІЙ ДЕТАЛЕЙ	
J.1 Застосування цього довідкового додатку.....	115
J.2 Сфера та область застосування.....	115
ДОДАТОК K (довідковий) МЕТОД БАЗОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МАКСИМУМІВ НАПРУЖЕНЬ	
K.1 Застосування цього довідкового додатку	148

K.2 Сфера та область застосування	148
K.3 Метод базових локальних максимумів напружень.....	148
ДОДАТОК L (довідковий) ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ, ВИБОРУ ЧАСТКОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ, ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПОШКОДЖЕНЬ, ІНТЕРВАЛІВ МІЖ ПЕРЕВІРКАМИ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ЯКЩО ПРИЙНЯТО ДОДАТОК J.....	
L.1 Застосування цього довідкового додатку.....	150
L.2 Сфера та область застосування	150
L.3 Методологія методу безпечного ресурсу	150
L.3.1 <i>Загальні положення</i>	150
L.3.2 <i>SLD-I</i>	151
L.3.3 <i>SLD-II</i>	151
L.4 Методологія методу допустимої пошкоджуваності	152
L.4.1 <i>Загальні положення</i>	152
L.4.2 <i>DTD-I</i>	152
L.4.3 <i>DTD-II</i>	154
L.5 Початок та інтервали перевірки.....	155
L.6 Часткові коефіцієнти γ_{Mf} та значення D_{lim}	156
L.7 Параметри виконання	159
L.7.1 <i>Категорія обслуговування</i>	159
L.7.2 <i>Визначення ступеня використання</i>	160
БІБЛІОГРАФІЯ	163
Посилання, наведені в рекомендаціях (тобто через пункти «рекомендовано», «має»)	163
Посилання, що містяться в дозволах (тобто через пункти «дозволено» , «можна»)	163
Посилання, що містяться у можливих варіантах (тобто через пункт «має можливість»)	164
ДОДАТОК НА (довідковий) ПЕРЕЛІК НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ УКРАЇНИ, ІДЕНТИЧНИХ ЄВРОПЕЙСЬКИМ ТА МІЖНАРОДНИМ НОРМАТИВНИМ ДОКУМЕНТАМ, ПОСИЛАННЯ НА ЯКІ Є В ЦЬОМУ СТАНДАРТІ.....	165

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ EN 1999-1-3:202__ (EN 1999-1-3:2023, IDT) «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-3. Конструкції схильні до втоми», прийнятий методом перекладу, — ідентичний щодо EN 1999-1-3:2023 (версія en) «Eurocode 9 — Design of aluminium structures — Part 1—1: Structures susceptible to fatigue».

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

Цей стандарт прийнято на заміну ДСТУ-Н Б EN 1999-1-3 «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-3. Конструкції чутливі до витривалості (EN 1999-1-1:2007, IDT)».

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

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

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

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

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

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

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

ПЕРЕДМОВА ДО EN 1999-1-3:2023

Цей стандарт (EN 1999-1-3:2023) підготував Технічний комітет CEN/TC250 «Будівельні Єврокоди», секретаріатом якого є BSI. CEN/TC 250 призначений CEN відповідальним за будівельні та геотехнічні питання проєктування та несе відповідальність за всі будівельні Єврокоди.

Цьому стандарту потрібно надати статус національного з публікуванням ідентичного тексту або схваленням не пізніше ніж у вересні 2027 року, а національні стандарти, положення яких суперечать цьому стандарту, потрібно скасувати не пізніше ніж у березні 2028 року.

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

Цей стандарт замінює EN 1999-1-3:2007.

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

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

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

Порівняно з попередньою редакцією у цей стандарт внесено такі

основні зміни:

- деяка реорганізація тексту та його узгодженість з EN 1999-1-1 та іншими Єврокодами;
- удосконалення рисунків;
- удосконалення категорій деталей для зварних з'єднань між елементами внапуск (Таблиця J.9);
- удосконалення категорій деталей для болтових з'єднань (Таблиця J.15);
- долучення ротаційного зварювання тертям (*friction stir welding; FSW*) до сфери застосування;
- долучення категорій деталей для елементів з ротаційним зварюванням тертям (нова Таблиця J.17).

Будь-які відгуки та запитання щодо цього стандарту рекомендовано надсилати до національних органів стандартизації користувачів. Повний перелік цих органів можна знайти на веб-сайті CEN.

Відповідно до внутрішніх постанов CEN/CENELEC цей стандарт зобов'язані прийняти національні органи стандартизації таких країн: Австрія, Бельгія, Болгарія, Хорватія, Кіпр, Чеська Республіка, Данія, Естонія, Фінляндія, Франція, Німеччина, Греція, Угорщина, Ісландія, Ірландія, Італія, Латвія, Литва, Люксембург, Мальта, Нідерланди, Норвегія, Польща, Португалія, Республіка Північна Македонія, Румунія, Сербія, Словаччина, Словенія, Іспанія, Швеція, Швейцарія, Туреччина та Велика Британія.

ВСТУП

0.1 Вступ до Єврокодів

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

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

Єврокоди призначені для застосування проєктувальниками, замовниками, виробниками, конструкторами, відповідними органами влади (при виконанні своїх обов'язків відповідно до національних або міжнародних норм), освітянами, розробниками програмного забезпечення та комітетами, які розробляють норми для відповідних стандартів на продукцію, випробування та виготовлення.

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

0.2 Вступ до EN 1999 (всі частини)

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

EN 1999 (усі частини) стосується лише вимог до міцності, експлуатаційної придатності, довговічності та вогнестійкості алюмінієвих конструкцій. Інші вимоги, наприклад, щодо тепло- або звукоізоляції, не розглядають.

EN 1999 (усі частини) не охоплює спеціальні вимоги до сейсмічного проєктування. Положення, пов'язані з такими вимогами, наведені в EN 1998, який доповнює і відповідає EN 1999 і узгоджений з ним.

Єврокод 9 складений з таких частин:

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

0.3 Вступ до EN 1999-1-3

Цей стандарт дає основу для проектування конструкцій з алюмінієвих сплавів, що зазнають втомлювального навантаження при граничному стані за несною здатністю.

0.4 Застосовні у Єврокодах уніфіковані мовні форми

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

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

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

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

0.5 Національний вступ до EN 1999-1-3

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

Національний стандарт, що впроваджує EN 1999-1-3, може містити національний додаток, що містить усі параметри, визначені на національному рівні, необхідні для проектування будівель і споруд цивільного призначення з метою будівництва у відповідній країні.

За відсутності національного вибору, потрібно використовувати вибір за замовчуванням, наведений у цьому стандарті.

Якщо національний вибір не визначено і в цьому стандарті не наведено вибір за замовчуванням, він може бути визначений відповідним органом влади або, якщо він не зазначений, то узгоджений для конкретного проєкту відповідними сторонами.

У EN 1999-1-3 національний вибір дозволено у таких пунктах:

4.1(2)	4.3.1(2)	4.3.2(5)	4.4(1) — 2 вибори
5(1)	6(2)	7.8.1(1)	7.8.2(1)
8.1.3(1) — 2 вибори	8.2.1(2)	8.2.1(7)	8.2.1(10)
A.4.1(4)	A.4.1(5)	E.2(6)	E.2(8)
I.3.2 (1)	I.3.3.2(1)	I.3.4(1)	L.4.2(5)
L.5(2)	L.6(3) — 2 вибори	L.6(4)	L.6(5)
L.7.1(1)			

У EN 1999-1-3 національний вибір дозволено під час застосування наступних довідкових додатків:

Додаток B	Додаток C	Додаток D	Додаток E
Додаток F	Додаток G	Додаток H	Додаток I
Додаток J	Додаток K	Додаток L	

Національний додаток може містити, безпосередньо або у формі посилання, несуперечливу додаткову інформацію для полегшення імплементації, за умови, що вона не змінює жодних положень Єврокодів.

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ЄВРОКОД 9.

ПРОЄКТУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЧАСТИНА 3. КОНСТРУКЦІЇ СХИЛЬНІ ДО ВТОМИ

DESIGN OF ALUMINIUM STRUCTURES PART 3. STRUCTURES SUSCEPTIBLE TO FATIGUE

Чинний від 202X-XX-XX

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Сфера застосування EN 1999-1-3

(1) EN 1999-1-1 містить основні правила проєктування конструкцій з алюмінієвих сплавів, що піддані втомі при граничному стані за несною здатністю.

(2) Цей стандарт містить вимоги щодо:

- методу безпечного ресурсу;
- методу допустимої пошкоджуваності;
- методу тестових випробувань на втому.

(3) Цей стандарт не поширюється на герметичні ємності або трубопроводи під тиском.

1.2 Припущення

(1) Застосовні загальні припущення стандарту EN 1990.

(2) Застосовні положення EN 1999-1-1.

(3) Цей стандарт призначений для використання разом з EN 1990, EN 1991 (всі частини), відповідними частинами EN 1992 — EN 1999, EN 1090-1 і EN 1090-3 щодо вимог до застосування, а також EN, EAD і ETA щодо будівельних виробів, які стосуються алюмінієвих

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

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

Примітка. Список інших цитованих документів, які не є нормативними посиланнями, включно з тими, на які посилаються як на рекомендації (тобто через пункти «рекомендовано», «має») та дозволи (тобто через пункти «дозволено», «можна») наведено у Бібліографії.

EN 1090-3:2019 Execution of steel structures and aluminium structures — Part 3: Technical requirements for aluminium structures

EN 1990 Eurocode — Basis of structural design

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

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 1090-3:2019 Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій.
Частина 3 Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій

EN 1990 Єврокод. Основи проектування конструкцій

EN 1999-1-1:2023 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1: Загальні правила».

3 ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ПОЗНАКИ

3.1 Терміни та визначення понять

У цьому стандарті вжито терміни та визначення понять, зазначені в EN 1990, EN 1999-1-1:2023, а також наведені нижче.

3.1.1 втома (*fatigue*)

Ослаблення конструкційної частини через виникнення та розвиток тріщин, спричинене повторюваними коливаннями напружень.

3.1.2 втомлювальне навантаження (*fatigue loading*)

Сукупність типових актів навантаження, що описані положеннями або переміщеннями навантажень, зміною їх інтенсивності, а також частотою та послідовністю їх виникнення.

3.1.3 акт навантаження (*loading event*)

Визначена послідовність завантаження конструкції, яку для потреб проектування приймають повторюваною із заданою періодичністю.

3.1.4 номінальне напруження (*nominal stress*)

Напруження в основному матеріалі, що прилягає до потенційного місця розташування тріщини, розраховане відповідно до простої теорії пружної міцності матеріалів, тобто за припущенням, що плоскі перерізи залишаються плоскими і без урахування ефектів концентрації напружень.

3.1.5 модифіковане номінальне напруження (*modified nominal stress*)

Номінальне напруження, збільшене на відповідний геометричний коефіцієнт концентрації напружень K_{gt} , щоб врахувати лише геометричні зміни поперечного перерізу, які не були враховані під час класифікації конкретного конструктивного елементу.

3.1.6 геометричне напруження, конструкційне напруження (*geometric stress, structural stress*)

Пружне напруження в точці, що враховує всі геометричні розриви, але ігнорує будь-які локальні особливості, де радіус переходу прямує до нуля, такі як прорізи що виникли через незначні неоднорідності, наприклад, підрізи зварних швів, тріщини,

тріщиноподібні дефекти, звичайні сліди механічної обробки тощо, і в принципі є таким самим параметром напруження, що і модифіковане номінальне напруження, але, як правило, оцінюють іншим методом.

3.1.7 геометричний (теоретичний) коефіцієнт концентрації напруження (*geometric stress concentration factor*)

Відношення геометричного напруження, визначеного з урахуванням лінійної пружної роботи матеріалу, та номінального напруження.

3.1.8 концентроване напруження (*hot spot stress*)

Геометричне напруження, що виникає у конкретному місці певної форми, наприклад, на краю зварного шва в кутовому порожнистому з'єднанні, для якого зазвичай відома втомна міцність, виражена через діапазон напружень у «гарячій точці».

3.1.9 історія напружень (*stress history*)

Безперервний хронологічний запис, виміряний або розрахований, зміни напружень у певній точці конструкції за певний період часу.

3.1.10 переломна точка напружень (*stress turning point*)

Значення напруження в історії напружень, при якому швидкість зміни напруження змінює знак.

3.1.11 точка максимуму напружень (*stress peak*)

Переломна точка, в якій швидкість зміни напруження змінюється з додатної на від'ємну.

3.1.12 точка мінімуму напружень (*stress valley*)

Переломна точка, в якій швидкість зміни напруження змінюється з від'ємної на додатну.

3.1.13 постійна амплітуда (*constant amplitude*)

Термін відноситься до будь-якої ділянки історії напружень, в межах якої відстань між точками максимуму та мінімуму напружень залишається незмінною.

3.1.14 змінна амплітуда (*variable amplitude*)

Термін відноситься до будь-якої ділянки історії напружень, в межах якої міститься більше однієї точки максимуму та мінімуму напружень.

3.1.15 цикл напружень (*stress cycle*)

Частина історії напружень постійної амплітуди, в якій напруження починається та закінчується з однаковим значенням, але одночасно проходить через одну точку максимуму та мінімуму (в будь-якій послідовності), а також цей термін означає певну частину історії напружень змінної амплітуди, визначену методом підрахунку циклів.

3.1.16 підрахунок циклів (*cycle counting*)

Процес перетворення історії напружень змінної амплітуди у спектр циклів напружень, кожен з яких має певний діапазон напружень, наприклад, метод «резервуару» та метод «дощового потоку».

3.1.17 метод «дощового потоку» (*rainflow method*)

Метод підрахунку циклів, що відтворює спектр діапазону напружень на основі історії напружень.

3.1.18 метод резервуарів (*reservoir method*)

Метод підрахунку циклів, що відтворює спектр діапазону напружень на основі історії напружень.

3.1.19 амплітуда напружень (*stress amplitude*)

Половина значення діапазону напружень.

3.1.20 коефіцієнт напруження (*stress ratio*)

Мінімальне напруження, поділене на максимальне напруження в історії напружень постійної амплітуди або в циклі, що отриманий з історії напружень змінної амплітуди.

3.1.21 коефіцієнт інтенсивності напруження (*stress intensity ratio*)

Мінімальна інтенсивність напруження, поділена на максимальну

інтенсивність напруження, що отримана з історії напружень постійної амплітуди або з циклу історії напружень змінної амплітуди.

3.1.22 середнє напруження (*mean stress*)

Середнє значення алгебраїчної суми максимальних та мінімальних значень напруження.

3.1.23 діапазон напружень (*stress range*)

Алгебраїчна різниця між точками максимуму та мінімуму напружень в межах одного циклу.

3.1.24 діапазон інтенсивності напруження (*stress intensity range*)

Алгебраїчна різниця між максимальною і мінімальною інтенсивністю напружень, що отримані за точками максимумів та мінімумів напружень в межах одного циклу.

3.1.25 спектр діапазону напружень (*stress-range spectrum*)

Гістограма частоти виникнення для всіх діапазонів напружень різних величин, що записана або розрахована для конкретного навантаження (також цей термін відомий під назвою спектр напруження).

3.1.26 розрахунковий спектр (*design spectrum*)

Загальне число всіх спектрів діапазонів напружень, що мають відношення до оцінки втоми.

3.1.27 категорія деталей (*detail category*)

Маркування надане конкретній деталі при заданому напрямі коливальних напружень для ідентифікації кривої втомної міцності в розрахунках на втому.

3.1.28 витривалість (*endurance*)

Наробіток до відмови, виражений в циклах, під впливом історії напружень постійної амплітуди.

3.1.29 крива втомної міцності (*fatigue strength curve*)

Кількісна залежність між діапазоном напружень і витривалістю, яка використовується для оцінки втоми категорії конструктивного елементу, що нанесена на логарифмічну шкалу у цьому стандарті.

Примітка 1 до пункту: Криві втомної міцності також відомі як криві $\log \Delta\sigma - \log N$, криві $S - N$ або криві Волера.

3.1.30 базова втомна міцність (*reference fatigue strength*)

Діапазон напружень постійної амплітуди $\Delta\sigma_C$ для певної категорії деталей для витривалості $N_C = 2 \times 10^6$ циклів.

3.1.31 межа втоми постійної амплітуди (*constant amplitude fatigue limit*)

Діапазон напружень, нижче значень якого всі діапазони напружень у розрахунковому спектрі не рекомендовано враховувати як такі, що спричиняють втомне руйнування.

3.1.32 гранична межа (*cut-off limit*)

Межа, нижче за яку діапазони напружень розрахункового спектру дозволено виключати з розрахунку накопичених пошкоджень.

3.1.33 розрахунковий строк експлуатації (*design service life*)

Передбачений період часу, протягом якого конструкцію або її частину буде використано за призначенням із передбаченим технічним обслуговуванням, але без потреби капітального ремонту.

3.1.34 безпечний ресурс (*safe life*)

Термін часу, впродовж якого конструкція має безпечно функціонувати з допустимою можливістю того, що відмова конструкції в результаті виникнення втомних тріщин не відбудеться при використанні методу безпечного ресурсу.

3.1.35 допустима пошкоджуваність (*damage tolerance*)

Здатність конструкції сприймати втомне розтріскування без

виникнення відмови або без ідентифікації конструкції як такої, що непридатна до подальшої експлуатації.

3.1.36 втомне пошкодження (*fatigue damage*)

Відношення кількості циклів заданого діапазону напружень, який необхідно підтримувати впродовж визначеного строку експлуатації, до витривалості конструкційної деталі під впливом такого ж діапазону напружень.

3.1.37 накопичення пошкоджень Майнера (*Miner's summation*)

Сукупність пошкоджень впродовж усіх циклів в спектрі діапазону напружень (або розрахунковому спектрі), що базується на правилі Пальмгрена-Майнера.

3.1.38 еквівалентне втомлювальне навантаження (*equivalent fatigue loading*)

Спрощене навантаження, зазвичай прикладене задану кількість разів таким чином, що його можна використовувати замість більш реалістичних навантажень при заданих умовах, щоб спричинити еквівалентну кількість втомних пошкоджень до прийнятого допустимого рівня.

3.1.39 еквівалентний діапазон напружень (*equivalent stress range*)

Діапазон напружень конструктивного елемента, що викликаний прикладенням еквівалентного втомлювального навантаження.

3.1.40 еквівалентне навантаження постійної амплітуди (*equivalent constant amplitude loading*)

Спрощене навантаження постійної амплітуди, що викликає той самий ефект втомних пошкоджень, що і реальні навантаження змінної амплітуди.

3.2 Позначи

Латинські великі літери

A — константа в рівнянні швидкості розвитку тріщини;

D — величина втомного пошкодження, розрахована для розрахункового строку експлуатації;

D_L — величина втомного пошкодження, розрахована для повного розрахункового строку експлуатації;

$D_{L,d}$ — розрахункова величина втомного пошкодження, визначена для повного розрахункового строку експлуатації;

D_{lim} — гранично допустима величина втомного пошкодження;

K — коефіцієнт інтенсивності напружень;

K_{gt} — геометричний коефіцієнт концентрації напружень;

L_{adh} — ефективна довжина клейових з'єднань внапуск;

N — кількість (або загальне число) циклів діапазону напружень;

N_C — кількість циклів (2×10^6), при яких визначають базову втомну міцність;

N_D — кількість циклів (5×10^6), при яких визначають межу втоми для постійної амплітуди;

N_i — прогнозована кількість циклів до руйнування для діапазону напружень $\Delta\sigma_i$;

N_L — кількість циклів (10^8), при якій визначають границю витривалості;

P — ймовірність;

R — коефіцієнт напруження;

T_F — рекомендований час після завершення монтажу до початку перевірки на втому, де перевірка на втому охоплює перевірку ділянок з високою ймовірністю появи тріщин;

T_f — час з моменту виявлення тріщини, за який тріщина досягає критичних руйнівних розмірів;

T_G — рекомендований час після завершення будівництва до

початку загального огляду, де загальний огляд охоплює перевірку незмінності та цілісності конструкції на момент введення в експлуатацію, виявлення дефектів, таких як пошкодження, викликані появою додаткових отворів або зварних швів для нових елементів, пошкодження внаслідок вандалізму або нещасних випадків, непередбачена корозія тощо;

T_i — періодичність перевірок;

T_L — розрахунковий строк експлуатації;

T_S — безпечний ресурс.

Латинські малі літери

a — висота кутового зварного шва;

a_c — ширина тріщини на поверхні;

da/dN — швидкість росту тріщини (м/цикл);

$f_{v,adh}$ — характеристична міцність клейового з'єднання на зсув;

k_{adh} — коефіцієнт втомної міцності клейових з'єднань;

k_F — кількість стандартних відхилів вище середньої очікуваної інтенсивності навантаження;

k_N — кількість стандартних відхилів вище середньої очікуваної кількості циклів навантаження;

l_d — мінімальна довжина тріщини, яку можна виявити;

l_f — критична довжина тріщини;

$\log$ — логарифм за основою 10;

m — константа зворотного нахилу кривої втомної міцності $\log \Delta \sigma - \log N$, або, відповідно, експонента швидкості росту тріщини;

m_1 — значення m для $N \leq 5 \times 10^6$ циклів;

m_2 — значення m для $5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ циклів;

n_i — кількість циклів діапазону напружень $\Delta \sigma_i$;

t — товщина;

y — коефіцієнт геометрії тріщини, що залежить від швидкості розвитку тріщини.

Грецькі великі літери

ΔK — діапазон інтенсивності напружень;

$\Delta \tau$ — діапазон ефективних напружень при зсуві;

$\Delta \sigma$ — номінальний діапазон напружень (нормальне напруження), стосується або ефекту від навантаження, або втомної міцності в залежності від контексту;

ΔT_G — рекомендований максимальний інтервал часу для загальної перевірки;

ΔT_F — рекомендований максимальний інтервал часу для перевірки на втому;

$\Delta \sigma_C$ — базовий показник втомної міцності при 2×10^6 циклах (нормальне напруження);

$\Delta \sigma_D$ — межа втоми для постійної амплітуди;

$\Delta \sigma_E$ — номінальний діапазон напружень від втомлювальних навантажень;

$\Delta \sigma_{E,2e}$ — еквівалентний діапазон напружень постійної амплітуди, пов'язаний з 2×10^6 циклами;

$\Delta \sigma_{E,Ne}$ — еквівалентний діапазон напружень постійної амплітуди, пов'язаних з $N_{\max}$;

$\Delta \sigma_i$ — діапазон постійних напружень для головних напружень у елементі конструкції для n_i циклів;

$\Delta \sigma_L$ — границя витривалості;

$\Delta \sigma_R$ — втомна міцність (нормальне напруження).

Грецькі малі літери

γ_{Ff} — частковий коефіцієнт інтенсивності втомного навантаження;

λ_i — коефіцієнт еквіваленту пошкодження, що залежить від умов навантаження та конструктивних особливостей, див. 7.8.2;

γ_{Mf} — частковий коефіцієнт втомної міцності;

σ_m — середнє напруження;

$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ — максимальнє і мінімальнє значення напружень, що

змінюються в циклі напружень.

4 ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ

4.1 Загальні положення

(1) При проєктуванні конструкцій під час розрахунку на втому потрібно з прийнятним рівнем імовірності гарантувати, що її експлуатаційні характеристики будуть достатніми протягом усього розрахункового строку експлуатації, тобто конструкція не вийде з ладу через втому і не потребуватиме додаткового ремонту протягом розрахункового строку експлуатації.

(2) Проєктування алюмінієвих конструкцій при розрахунках на втому дозволено виконувати за одним з наступних методів:

a) метод безпечного ресурсу (*safe life design; SLD*) (див. 4.2.1);

b) метод допустимої пошкоджуваності (*damage tolerant design; DTD*) (див. 4.2.2).

Будь-який з методів a) і b) можна доповнити або замінити методом тестових випробувань на втому (див. 4.3.3).

Національна примітка.

В посиланні допущено технічну помилку. Замість 4.3.3 має бути 4.2.3

Примітка. Умови застосування вищезазначених методів проєктування може бути наведено в національному додатку.

(3) Метод розрахунку на втому рекомендовано обирати з урахуванням призначення конструкції, зважаючи на клас наслідків її

елементів. Зокрема, має бути врахована доступність для огляду елементів і деталей, де ймовірна поява втомних тріщин.

(4) Оцінку втоми елементів і конструкцій рекомендовано розглядати у випадках, коли навантаження є часто змінними, особливо у випадку зміни їх напрямку.

Примітка 1. Приклади поширених ситуацій, в яких це може відбуватися:

- елементи, що підтримують підйомні пристрої або рухомі навантаження;
- елементи, що піддані повторюваним циклам навантаження від вібруючих механізмів;
- елементи, піддані коливанням, що спричинені вітром;
- елементи, піддані коливанням, що спричинені натовпом;
- рухомі конструкції (конструкції, на які діють сили інерції);
- елементи, що зазнають коливань, спричинених потоком рідини або хвильовою дією.

Примітка 2. Положення щодо втомної міцності, наведені в цьому стандарті, як правило, застосовні до багатоциклової втоми. Для малоциклової втоми вказівки наведено в Додатку F.

(5) Мають бути дотримані основи розрахунку втомної міцності, наведені в Додатку A.

4.2 Методи розрахунку на втому

4.2.1 Метод безпечного ресурсу (*Safe life design; SLD*)

(1) Проєктування за методом безпечного ресурсу рекомендовано застосовувати тоді, коли під час експлуатації не передбачено перевірку на наявність втомних пошкоджень.

(2) Під час проєктування за методом безпечного ресурсу рекомендовано застосовувати основи розрахунку втомної міцності, наведені в A.4.

4.2.2 Метод допустимої пошкоджуваності (*Damage tolerant design; DTD*)

(1) Проєктування за методом допустимої пошкоджуваності, рекомендовано застосовувати тоді, коли розроблена і виконується визначена програма обстежень і технічного обслуговування для виявлення і усунення будь-яких втомних пошкоджень протягом розрахункового строку експлуатації конструкції. Він має забезпечувати прийнятну надійність, яка гарантує, що конструкція буде задовільно функціонувати протягом розрахункового строку експлуатації.

Примітка 1. Метод допустимої пошкоджуваності застосовний для випадків, коли оцінка безпечного ресурсу показує, що втома має значний вплив на економічність проєкту, і коли може бути виправданий вищий ризик втомного розтріскування протягом проєктного строку експлуатації, ніж дозволений за принципами методу безпечного ресурсу. Цей підхід спрямований на забезпечення такого самого рівня надійності, як і при використанні методу безпечного ресурсу.

Примітка 2. Метод допустимої пошкоджуваності є застосовним у двох різних типах методології, DTD-I та DTD -II, див. Додаток L.

(2) У випадку застосування методу допустимої пошкоджуваності рекомендовано дотримуватися передумов його застосування та стратегії проведення перевірок, наведених у А.5.

4.2.3 Метод тестових випробувань на втому

(1) Цей підхід рекомендовано застосовувати, коли необхідні дані про навантаження, реакцію, втомну міцність або ріст тріщин відсутні в стандартах або інших джерелах для конкретного випадку застосування, а також для оптимізації елементів конструкції. Дані випробувань рекомендовано використовувати замість стандартних даних, тільки якщо вони отримані і застосовані в контрольованих умовах.

Примітка. Вказівки щодо верифікації проєктних рішень, отриманих на основі методу тестових випробувань на втому наведено в Додатку С.

4.3 Втомлювальне навантаження

4.3.1 Джерела втомлювального навантаження

(1) Мають бути ідентифіковані всі джерела змінних напружень в конструкції.

Примітка 1. Загальні випадки втомлювального навантаження наведено в 4.1(4).

Примітка 2. Для обмеження втоми, спричиненої повторною втратою місцевої стійкості, див. D.5.

(2) Втомлювальне навантаження рекомендовано приймати за EN 1991 (усі частини) або іншими відповідними Європейськими стандартами. Крім того, мають бути враховані положення 4.3.2.

Примітка. Визначення втомлювальних навантажень для випадків, які не охоплено Європейським стандартом, може бути наведене в національному додатку.

(3) Динамічні ефекти рекомендовано враховувати, якщо їх не було враховано під час визначення втомлювальних навантажень.

4.3.2 Опис втомлювального навантаження

(1) Втомлювальне навантаження має бути описане в поняттях розрахункового спектру навантаження, який визначає діапазон інтенсивностей змінних у часі навантажень і кількість реалізацій навантажень заданої інтенсивності протягом розрахункового строку експлуатації конструкції. Якщо існує ймовірність виникнення двох або більше незалежних випадків навантаження під час експлуатації, має бути визначена їх послідовність.

(2) Реалістична оцінка втомлювального навантаження має вирішальне значення для розрахунку строку експлуатації конструкції. За відсутності опублікованих даних про діюче навантаження рекомендовано використовувати дані про втомлювальне навантаження для існуючих конструкцій, що зазнають подібних

навантажень.

(3) Шляхом безперервної фіксації деформації або прогину протягом відповідного періоду спостережень, дані про втомлювальне навантаження мають бути визначені на основі подальшого аналізу реакцій конструкції. Особливу увагу рекомендовано приділяти аналізу ефектів динамічного посилення, коли частоти навантаження близькі до однієї з власних частот конструкції.

Примітка. Подальші вказівки наведено в Додатку С.

(4) Розрахунковий спектр навантажень рекомендовано вибирати як верхню межу оцінки накопичених умов експлуатації протягом повного розрахункового строку експлуатації конструкції. Водночас рекомендовано враховувати всі ймовірні експлуатаційні навантаження та впливи навколишнього середовища, що виникають внаслідок прогнозованого використання конструкції впродовж зазначеного періоду.

(5) Довірча межа, що буде використана для інтенсивності спектра розрахункового навантаження, має ґрунтуватися на середньому прогнозованому значенні плюс k_F середньоквадратичних відхилів. Довірча межа, що буде використана для кількості циклів у спектрі розрахункового навантаження, має ґрунтуватися на середньому прогнозованому значенні плюс k_N середньоквадратичних відхилів.

Примітка. Значення k_F дорівнює 2,0 і значення k_N дорівнює 2,0, якщо в національному додатку не вказано інші значення. Див. також Примітку 2 в 4.4 (1).

4.3.3 Еквівалентне втомлювальне навантаження

(1) Спрощене еквівалентне втомлювальне навантаження дозволено використовувати, якщо виконано наступні умови:

а) конструкція розташована в межах діапазону основних конструктивних форм і розмірів, для яких еквівалентне втомлювальне навантаження було отримано раніше;

b) реально діюче втомлювальне навантаження має подібну інтенсивність та частоту і прикладене аналогічно до того, що було прийняте під час визначення еквівалентного втомлювального навантаження;

c) значення m_1, m_2, N_D і N_L , див. рисунок 8.1, які прийняті під час визначення еквівалентного втомлювального навантаження є тотожними тим значенням, які фігурують в аналізі заданого конструктивного елемента;

Примітка. Деякі еквівалентні втомлювальні навантаження можуть бути отримані за умови простого безперервного нахилу, де $m_1 = m_2$ і $\Delta\sigma_L = 0$. Для багатьох випадків застосування, що включають численні цикли з низькою амплітудою, це призведе до дуже консервативної оцінки строку експлуатації.

d) динамічна реакція конструкції є достатньо низькою, щоб резонансні ефекти, на які впливатимуть різниця в масі, жорсткості та коефіцієнті демпфірування, не мали значного впливу на загальний підсумок накопичення пошкоджень Майнера.

(2) Якщо еквівалентне втомлювальне навантаження розраховано спеціально для конструкцій з алюмінієвих сплавів, рекомендовано враховувати всі питання, розглянуті вище в параграфі (1).

4.4 Часткові коефіцієнти втомлювального навантаження

(1) Якщо втомлювальні навантаження F_{Ek} було визначено відповідно до вимог 4.3.1 (2) і 4.3.2, до навантажень рекомендовано застосовувати частковий коефіцієнт для втомлювальних навантажень γ_{Ff} , щоб отримати розрахункове навантаження F_{Ed} як зазначено у формулі (4.1):

$$F_{Ed} = \gamma_{Ff} \cdot F_{Ek} \quad (4.1)$$

Примітка 1. Значення γ_{Ff} дорівнює 1,0, якщо тільки в національному додатку не вказано інше значення.

Примітка 2. Якщо втомлювальні навантаження базуються на довірчих межах, відмінних від наведених у 4.3.2 (6), значення часткових коефіцієнтів для навантажень наведено в Таблиці 4.1 (NDP), якщо тільки в національному додатку не наведено інші значення.

Таблиця 4.1 (NDP) — Рекомендовані часткові коефіцієнти γ_{Ff} для інтенсивності та кількості циклів у спектрі втомлювального навантаження

k_F	γ_{Ff}	
	$k_N = 0$	$k_N = 2$
0	1,5	1,4
1	1,3	1,2
2	1,1	1,0

4.5 Вимоги до виконання

4.5.1 Загальні положення

- (1) Потрібно підготувати технічне завдання на виконання (див. 4.5.3).
- (2) Рекомендовано підготувати інструкцію з експлуатації (див. 4.5.4).
- (3) Рекомендовано підготувати інструкцію з огляду та технічного обслуговування (див. 4.5.5).

4.5.2 Класи виконання

- (1) Відповідний клас виконання рекомендовано обирати відповідно до EN 1999-1-1:2023.

Примітка 1. EN 1090-3 потребує вибору класів виконання. Вони можуть бути пов'язані з категорією обслуговування.

Примітка 2. Настанови щодо ступеня використання наведено в L.7 для випадків, коли прийнято дані Додатку J щодо опору. Визначення ступеня використання наведено в EN 1999-1-1:2023, Додаток A.

4.5.3 Технічне завдання на виконання

- (1) Технічне завдання на виконання має містити всі вимоги до підготовки матеріалу, монтажу, з'єднання, подальшої обробки та

контролю з метою досягнення необхідної втомної міцності.

(2) У технічному завданні на виконання потрібно вказати, що виконання здійснюють відповідно до EN 1090-3.

4.5.4 Інструкція з експлуатації

(1) Посібник з експлуатації має містити:

- дані щодо втомлювального навантаження та розрахункового строку експлуатації, які прийняті під час проектування;
- будь-які необхідні вимоги щодо моніторингу інтенсивності та частоти навантажень під час експлуатації;
- інструкцію, що забороняє будь-яку модифікацію конструкції, наприклад, виконання отворів або зварювання, без кваліфікованого аналізу будь-яких конструктивних наслідків;
- інструкції з демонтажу та повторного монтажу деталей, наприклад, затягування кріплень;
- прийнятні методи ремонту в разі випадкового пошкодження в процесі експлуатації (наприклад, ум'ятини, пробоїни, розриви тощо).

4.5.5 Інструкція з технічного огляду та обслуговування

(1) Інструкція з технічного обслуговування має містити графік будь-яких необхідних перевірок в процесі експлуатації чутливих до втоми елементів. Зокрема, якщо під час проектування було враховано стійкість до пошкоджень, інструкція має містити:

- методи перевірки;
- місця проведення перевірок;
- частоту перевірок;
- максимально допустимий розмір тріщини, при якому необхідна корекція;
- рекомендації щодо методів ремонту або заміни деталей, що отримали втомні тріщини.

5 МАТЕРІАЛИ, СКЛАДОВІ ВИРОБИ ТА З'ЄДНУВАЛЬНІ ПРИБОРИ

(1) Правила проектування, наведені у цьому стандарті потрібно застосовувати до складових виробів у компонентах і конструкціях, перелічених у EN 1999-1-1:2023, за винятком низькоміцних сплавів EN AW-3005, EN AW-3103, EN AW-5005, EN AW-8011A всіх станів обробки та EN AW-6060 стану обробки T5.

Примітка 1. Для вищезгаданих низькоміцних сплавів і станів обробки не існує надійних даних про втому. Дані про втому для таких сплавів і станів обробки, відповідно, може бути наведено в національному додатку.

Примітка 2. Настанови щодо отримання даних випробувань наведено в Додатку С.

Примітка 3. Настанови щодо лиття наведено в Додатку І.

(2) Цей стандарт охоплює елементи відкритого та порожнистого закритого профіля, включаючи елементи, виготовлені з комбінацій цих профілів.

(3) Цей стандарт охоплює елементи та конструкції з наступними типами з'єднань:

- дугове зварювання (металевим інертним газом і вольфрамовим інертним газом);
- ротаційне зварювання тертям;
- сталеві болти, перелічені в EN 1999-1-1:2023, Таблиця 5.9.

Примітка 1. Вказівки щодо клейового з'єднання наведені в Додатку Е.

Примітка 2. Для розрахунку на втому та перевірки сталевих болтів на розтяг і зсув див. EN 1993-1-9.

6 ДОВГОВІЧНІСТЬ

(1) Дані щодо втомної міцності, наведені в цьому стандарті, застосовні за нормальних атмосферних умов до температури 100°C. Однак у випадку сплаву EN AW-5083 за температури понад 65°C дані

щодо втомної міцності, наведені в цьому стандарті, не застосовують, якщо тільки не передбачене ефективне антикорозійне покриття.

(2) Дані щодо втомної міцності застосовують не за всіх умов агресивного впливу. Рекомендовано дотримуватися положень 8.2 та 8.4 щодо матеріалів та впливу навколишнього середовища.

Примітка. Додаткову інформацію щодо довговічності під дією локальних впливів навколишнього середовища можна знайти в національному додатку.

(3) Для клейових з'єднань рекомендовано враховувати особливі умови та вплив навколишнього середовища.

Примітка. Рекомендації наведено у додатку Е.

7 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ

7.1 Загальний аналіз

7.1.1 Загальні положення

(1) Метод аналізу рекомендовано обирати так, щоб забезпечити точне визначення пружних напружень в конструкції під дією заданого втомлювального навантаження для можливості отримання максимальних та мінімальних значень напружень в історії навантаження, див. рисунок 7.1.

Примітка. Пружна модель, застосована для статичної оцінки (для граничного стану або стану обмеженої експлуатаційної придатності) відповідно до EN 1999-1-1, не обов'язково є прийнятною для оцінки втоми.

(2) Динамічні впливи рекомендовано включати в розрахунок історії напружень, за винятком випадків, коли застосовано еквівалентну дію, яка вже враховує такі впливи.

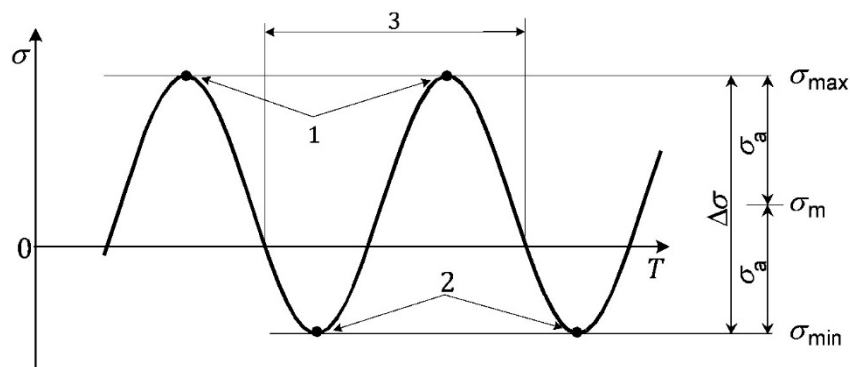
(3) Якщо на пружну реакцію впливає ступінь демпфірування, то її значення має бути визначене експериментально.

Примітка. Настанови щодо проведення випробувань наведено в Додатку С.

(4) У статично невизначених конструкціях не рекомендовано передбачати пластичний перерозподіл зусиль між елементами.

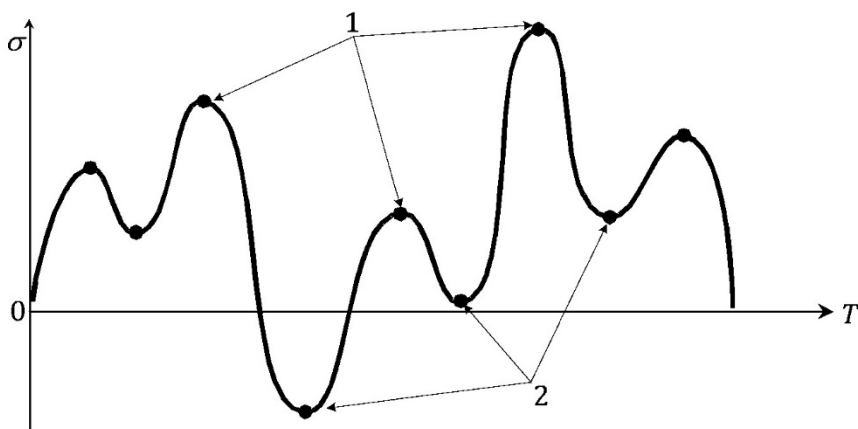
(5) Додаткові жорсткості будь-яких інших матеріалів, які постійно закріплені на алюмінієвій конструкції, мають бути враховані в пружних розрахунках.

(6) Моделі для загального аналізу статично невизначених конструкцій і решітчастих рам з жорсткими або напівжорсткими вузловими з'єднаннями (наприклад, моделі скінченних елементів) мають ґрунтуватися на поведінці пружного матеріалу, за винятком випадків, коли дані про деформації було отримано з конструкцій-прототипів або точно масштабованих фізичних моделей.



а) Постійна амплітуда

Рисунок 7.1 — Термінологія, що стосується історії напружень та циклів



б) Змінна амплітуда

Умовні позначки:

1 — точки максимуму напружень;	$\sigma_{\min}$ — мінімальне напруження;
2 — точки мінімуму напружень;	σ_m — середнє напруження;
3 — цикл напруження;	$\Delta\sigma$ — діапазон (розмах) напружень;
0 — переломна точка напружень;	σ_a — амплітуда напружень
$\sigma_{\max}$ — максимальне напруження;	

Рисунок 7.1 — Аркуш 2

7.1.2 Використання балкових елементів

(1) Балкові елементи рекомендовано застосовувати для загального аналізу балкових, рамних або решітчастих конструкцій з урахуванням обмежень, наведених у пунктах (2) — (7).

(2) Балкові елементи не рекомендовано використовувати для аналізу втоми підкріплених пластинчастих конструкцій, сформованих з плоских або оболонкових елементів, а також для литих або кованих елементів, якщо вони не мають простої призматичної форми.

(3) Жорсткість перерізів балкових елементів на розтяг, згин, зсув і кручення рекомендовано розраховувати відповідно до лінійної теорії пружності, припускаючи, що плоскі перерізи залишаються плоскими. Однак має бути враховано деформацію поперечного перерізу внаслідок кручення.

(4) Якщо балкові елементи використано в конструкціях з елементами відкритого профіля або порожнистого профіля, схильними до викривлення, які піддані впливу сил кручення, рекомендовано, щоб елементи мали щонайменше 7 ступенів свободи, включно з викривленням. В якості альтернативи для моделювання поперечного перерізу рекомендовано використовувати оболонкові елементи.

(5) Властивості перерізів елементів балок, прилеглих до перетинів елементів, мають враховувати підвищену жорсткість, зумовлену розмірами зони з'єднання та наявністю додаткових компонентів (наприклад, накладок, з'єднувальних пластин тощо).

(6) Жорсткість елементів балок, які використано для

моделювання ділянок з'єднання в кутових перетинах між відкритими або порожнистими елементами, коли їх поперечні перерізи не повністю проходять через з'єднання (наприклад, нежорсткі трубчасті вузли), або коли конструктивна деталь є напівжорсткою (наприклад, болтове з'єднання торцевих пластин або кутові з'єднання), рекомендовано оцінювати або за допомогою оболонкових елементів, або шляхом з'єднання елементів за допомогою пружин. Рекомендовано, щоб пружини мали достатню жорсткість для кожного ступеня свободи, а їх жорсткість має бути визначена або експериментально, або за допомогою моделей оболонкових елементів з'єднання.

(7) Якщо балкові елементи використано для моделювання конструкції з ексцентриситетами між осями елементів у з'єднаннях, або якщо навантаження та в'язі прикладено до елементів не на їх осях, то для підтримування статичної рівноваги в цих положеннях рекомендовано використовувати жорсткі з'єднувальні елементи. За необхідності рекомендовано використовувати пружини, подібні до тих, що наведені в (6).

7.1.3 Використання мембранних, оболонкових та твердотільних елементів

(1) Мембранні елементи рекомендовано використовувати тільки в тих частинах конструкції, де напруження від згину поза площиною, як відомо, є незначними.

(2) Оболонкові елементи можна використовувати для всіх типів конструкцій, за винятком випадків, коли використано литі, ковані або механічно оброблені елементи складної форми, що включають тривимірні поля напружень, в яких рекомендовано використовувати твердотільні елементи.

(3) Якщо в процесі загального аналізу використано мембранні

або оболонкові елементи, для врахування ефектів концентрації напружень, таких як перераховані в 7.2.3, розмір сітки має бути достатньо малим для елемента, де утворюються концентрації напружень, щоб повністю оцінити цей ефект.

Примітка. Рекомендації щодо аналізу напружень наведено в Додатку D.

7.2 Типи напружень

7.2.1 Загальні положення

(1) Можна використовувати три різні типи напружень, а саме:

- a) номінальні напруження, див. 7.2.2 та 7.3.1;
- b) модифіковані номінальні напруження, див. 7.2.3 та 7.3.2;
- c) локальні максимуми напружень, див. 7.2.4 та 7.3.3.

7.2.2 Номінальні напруження

(1) Номінальні напруження, див. рисунок 7.2, рекомендовано використовувати безпосередньо для оцінки місць початку руйнування в простих елементах і з'єднаннях, якщо виконано наступні умови:

- a) деталі конструкції, пов'язані з місцем початку руйнування, представлені категоріями деталей; та

Примітка. Щодо категорій деталей див. 8.1.

- b) категорію деталей було встановлено за результатами експериментальних випробувань, результати яких були виражені в значеннях номінальних напружень; та

Примітка. Вказівки щодо проведення випробувань наведено у Додатку C.

- c) поблизу місця початку руйнування відсутні раптові геометричні ефекти, зокрема ті, що перелічені в 7.2.3.

7.2.3 Модифіковані номінальні напруження

(1) Модифіковані номінальні напруження рекомендовано використовувати замість номінальних напружень, якщо місце початку руйнування розташоване поблизу одного або декількох з наступних чинників концентрації геометричних напружень (див. рисунок 7.2), якщо умови 7.2.2(a) або (b) все ще застосовні:

а) раптова зміна форми поперечного перерізу, наприклад, у вирізах або кутах повороту;

б) раптова зміна жорсткості вздовж усього поперечного перерізу елемента в непідкріплених кутових з'єднаннях між відкритими або порожнистими профілями;

с) зміни напрямку або положення, що виходять за рамки дозволених в таблицях категорій деталей;

д) запізнення при зсуві в широких листах;

Примітка. Див. EN 1999-1-1:2023, Додаток J.

е) викривлення порожнистих елементів;

ф) нелінійний згин поза площиною тонких плоских пластин, наприклад, перерізів класу 4, де статичне напруження близьке до критичного, наприклад, поле розтягу в стінках.

Примітка. Рекомендації щодо аналізу напружень наведено в Додатку D.

(2) Вищевказані геометричні ефекти концентрації напружень рекомендовано враховувати за допомогою коефіцієнта K_{gt} , див. рисунок 7.2, який визначають як теоретичну концентрацію напружень, оцінену для лінійно пружного матеріалу без урахування всіх чинників (локальних або геометричних), що вже включені в криву втомної міцності $\Delta\sigma - N$ класифікованої деталі конструкції, прийнятої за еталон.

7.2.4 Локальні максимуми напружень

(1) Локальні максимуми напружень можна використовувати тільки тоді, коли виконана одна з наступних умов:

а) місцем початку руйнування є горизонтальний край шва у місці зі складною геометрією, де номінальні напруження визначені не чітко;

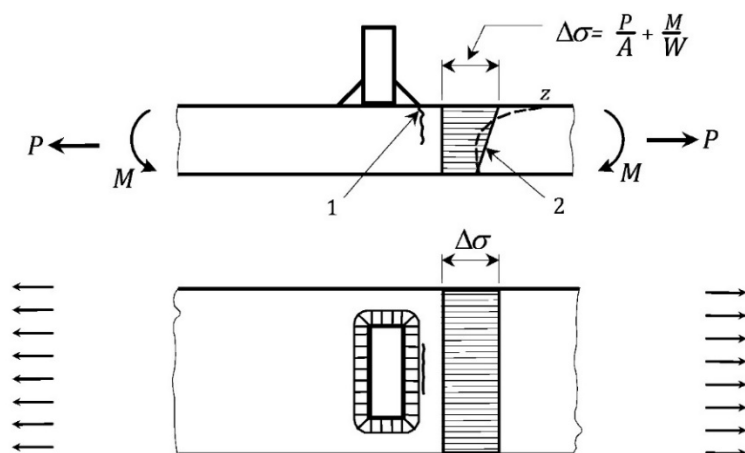
Примітка 1. Через значний ефект зони термічного впливу на міцність зварних алюмінієвих деталей, досвід, отриманий на сталевих деталях, не може бути застосований до алюмінієвих.

б) категорію деталі з гарячою точкою було встановлено методом тестових випробувань на втому, а результати були виражені у вигляді локальних максимумів напружень у гарячій точці для відповідного типу навантаження;

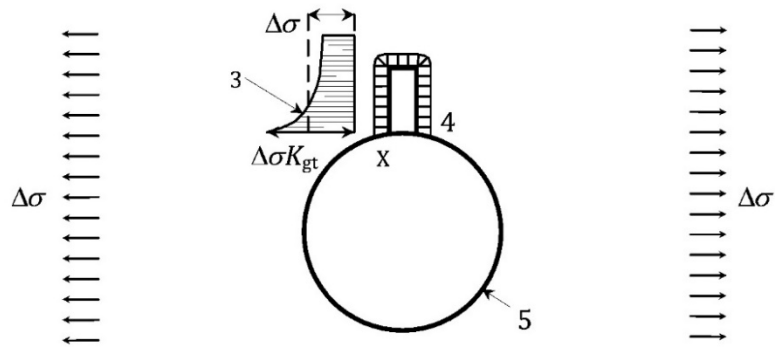
с) згинальні напруження в оболонці виникають у гнучких з'єднаннях і враховано відповідно до 7.1.2(6);

Примітка 2. Для отримання рекомендацій див. додатки C, D і K.

Примітка 3. Для визначення локальних максимумів напружень див. 7.3.3 та 8.2.4.

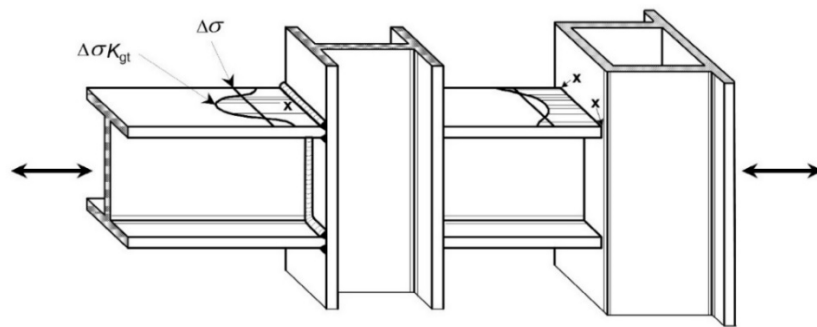


а) Концентрація локальних напружень в зоні зварного шва



б) Повна концентрація напружень при великому отворі

Рисунок 7.2 — Приклади номінальних і модифікованих номінальних напружень



с) Складна точка в з'єднанні

Умовні позначки:

- 1 — місце утворення тріщини;
- 2 — лінійний розподіл напружень, коефіцієнт напружень примикання зварного шва у напрямку z не розраховується;
- 3 — нелінійний розподіл напружень;
- 4 — зварний шов;
- 5 — великий отвір;

$\Delta\sigma$ — номінальний діапазон напружень;
 $\Delta\sigma K_{gt}$ — модифікований діапазон номінальних напружень в точці появи тріщини x через отвір; модифікований діапазон номінальних напружень в точці появи тріщини x за рахунок ефекту геометричної концентрації напружень

Рисунок 7.2 — Аркуш 2

7.3 Визначення напружень

7.3.1 Визначення номінальних напружень

7.3.1.1 Моделі конструкцій з використанням балкових елементів

- (1) Осьові та зсувні напруження в місці утворення тріщин

рекомендовано визначати з урахуванням осьових, згинальних, поперечних та крутних зусиль у відповідному перерізі, використовуючи властивості лінійного пружного перерізу.

(2) Площі поперечних перерізів і їх модулі мають враховувати будь-які специфічні вимоги, що висунуто до деталі конструкції.

7.3.1.2 Моделі конструкцій з використанням мембранних, оболонкових або твердотільних елементів

(1) Якщо розподіл осьових напружень є лінійним по перерізу елемента відносно обох осей, то напруження в початковій точці можна використовувати безпосередньо.

(2) Якщо розподіл осьових напружень нелінійний по перерізу елемента відносно будь-якої осі, напруження по перерізу мають бути проінтегровані для отримання повздовжньої сили і згинальних моментів. Останні мають бути використані разом з відповідною площею поперечного перерізу і його модулем для отримання номінальних напружень.

7.3.2 Визначення модифікованих номінальних напружень

7.3.2.1 Моделі конструкцій з використанням балкових елементів

(1) Номінальні напруження рекомендовано множити на відповідні коефіцієнти концентрації пружних напружень K_{gt} відповідно до розташування місця їх виникнення та типу поля напружень.

(2) Коефіцієнти концентрації пружних напружень K_{gt} мають враховувати всі геометричні особливості, за винятком тих, що вже включені в категорію деталі.

(3) Коефіцієнти концентрації пружних напружень K_{gt} рекомендовано визначати за допомогою одного з наступних підходів:

а) стандартні рішення для коефіцієнтів концентрації напружень;

Примітка. Вказівки щодо коефіцієнтів концентрації напружень наведено в D.4.

б) розбиття навколишньої геометрії за допомогою оболонкових елементів з урахуванням параграфу (2) і прикладання номінальних напружень до країв;

с) вимірювання пружних деформацій на фізичній моделі, яка має суттєві геометричні неоднорідності, але виключає ті особливості, які вже враховані в категорії деталей (див. (2)).

7.3.2.2 Моделі конструкцій з використанням мембранних, оболонкових або твердотільних елементів

(1) Якщо модифіковане номінальне напруження має бути отримане на основі загального аналізу біля ділянки утворення тріщини, то його рекомендовано вибирати на наступних засадах:

а) локальні концентрації напружень, такі як класифікована деталь конструкції та профіль зварного шва, що вже включені в категорію деталі, рекомендовано не враховувати;

б) сітка для ділянки утворення тріщини має бути достатньо дрібною, щоб точно спрогнозувати загальне поле напружень навколо цієї ділянки, але без врахування впливів, наведених у пункті (а).

Примітка. Рекомендації щодо використання скінченних елементів для аналізу втомі наведено в D.3.

7.3.3 Визначення локальних максимумів напружень

(1) Напруження в «гарячій точці» — це головне напруження, яке переважно є поперечним до лінії дотику шва, і його рекомендовано оцінювати в цілому числовими або експериментальними методами, за винятком випадків, коли доступні стандартні рішення.

Примітка. Вказівки наведено у D.3.

(2) Для простих випадків, як показано на Рисунку 7.2 (с), напруження в «гарячій точці» можна приймати як модифіковане номінальне напруження і розраховувати згідно з 7.2.3.

(3) Загалом, для випадків, коли стандартні коефіцієнти концентрації напружень не можна застосувати, а тому вони потребують спеціального аналізу, втомне напруження біля краю зварного шва не має враховувати ефекти концентрації напружень, зумовлені класифікованою деталлю конструкції, яку розглядають як еталонну, тобто геометрією краю шва.

7.3.4 Орієнтація напружень

(1) Потрібно, щоб діапазон головних напружень потрібно був найбільшою алгебраїчною різницею між значеннями головних напружень, що діють у головних площинах, розташованих під кутом не більше 45° одна від одної.

(2) Якщо напрямок головного напруження розтягу становить менше 45° до осі зварного шва, рекомендовано вважати, що деталь конструкції паралельна цій осі.

7.4 Розподіл напружень в зонах виникнення пошкоджень від втоми

7.4.1 Основний матеріал, зварні шви та механічні з'єднання

(1) Тріщини, що виникають на краях зварних швів, в тілі зварних швів, біля отворів для кріплень, на поверхнях зношування тощо і поширюються через основний матеріал або метал шва, рекомендовано оцінювати з використанням номінального діапазону головних напружень елемента в цій точці.

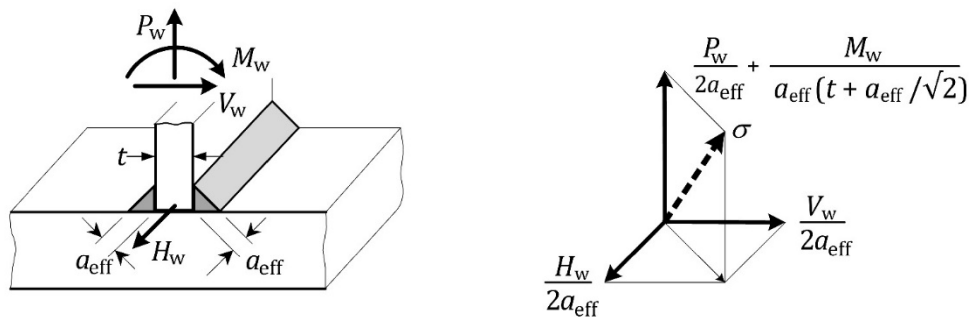
(2) Ефекти локальної концентрації напружень у профілях зварних швів, отворах для болтів і заклепок враховано в даних міцності $\Delta\sigma - N$

для відповідної категорії деталей конструкцій.

7.4.2 Кутові та стикові зварні шви з неповним проваром

(1) Тріщини, що починаються від коренів шва та поширюються через його тіло, рекомендовано оцінювати за діапазоном напружень $\Delta\sigma$, де σ — це векторна сума напружень у металі шва, що базується на ефективній товщині шва, див. рисунок 7.3.

Примітка. Базове значення міцності може бути прийняте, як для деталі конструкції 9.2, Таблиця J.9.



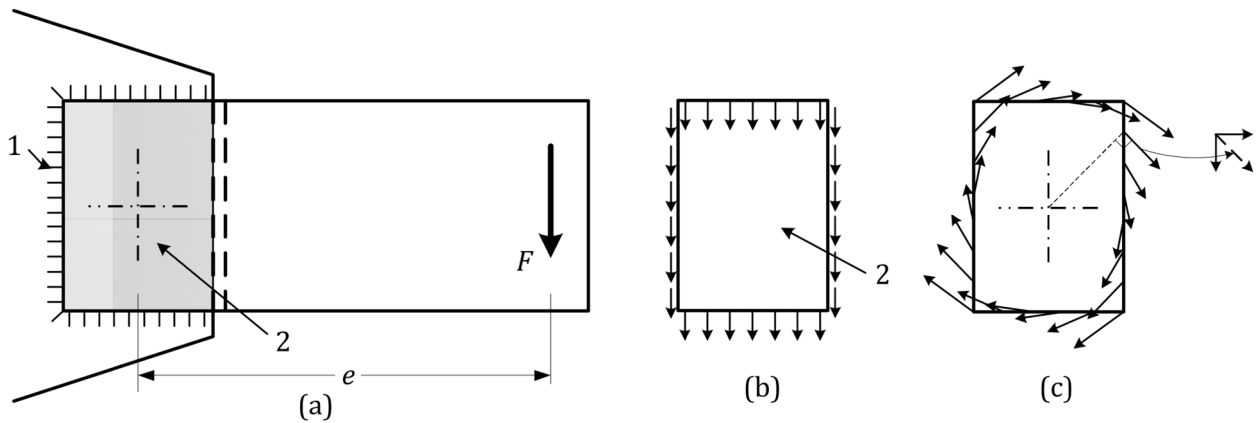
Умовні позначки:

P_w, H_w і M_w — сили (моменти) на одиницю довжини.

Рисунок 7.3 — Напруження в зварних швах

(2) У з'єднаннях внапуск в одній площині напруження на одиницю довжини зварного шва можна розрахувати на основі середньої площі для поздовжніх сил і полярного модуля пружності групи зварних швів для моментів у площині (див. рисунок 7.4).

Примітка. Базове значення міцності може бути взяте, як для деталі конструкції 9.4, Таблиця J.9.



Умовні позначки:

- a) — прикладене зсувне зусилля F ;
- b) — епюра напружень від зсувного зусилля F ;
- c) — епюра напружень від моменту $M = Fe$;
- 1 — зварний шов внапуск;
- 2 — площа напуску

Рисунок 7.4 — Напруження у з'єднаннях внапуск

7.5 Клейові з'єднання

(1) Оцінка втоми має базуватися на поверхні руйнування через площину з'єднання.

Примітка. Рекомендації наведено в Додатку Е.

7.6 Ливарні з'єднання

(1) Рекомендовано використовувати головні геометричні напруження.

(2) У випадку складних форм може знадобитися аналіз напружень методом скінченних елементів або тензометрія, якщо стандартні розрахунки недоступні.

7.7 Спектри напружень

(1) Для отримання спектрів напружень можна використовувати методи, наведені в Додатку А для підрахунку циклів діапазонів напружень.

7.8 Розрахунок еквівалентного діапазону напружень для типових моделей втомлювального завантаження

7.8.1 Загальні положення

(1) Оцінку втоми для стандартизованих втомлювальних навантажень, як зазначено в EN 1991 (всі частини), рекомендовано проводити відповідно до одного з наступних підходів:

- а) діапазони номінальних напружень для деталей конструкції, наведені в інформації про категорію деталі;
- б) модифіковані діапазони номінальних напружень, де раптові зміни перерізу відбуваються поблизу місця виникнення тріщин, які не включені до інформації про деталі конструкції;
- с) діапазони геометричних напружень, де значні перепади напружень виникають поблизу краю шва.

Примітка. Національний додаток може містити інформацію про використання номінальних діапазонів напружень або модифікованих номінальних діапазонів напружень.

(2) Розрахунковим значенням діапазону напружень, звсстосованого для оцінки втоми, має бути діапазон напружень $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}$, що відповідає $N_C = 2 \times 10^6$ циклів.

7.8.2 Розрахункове значення діапазону напружень

(1) Розрахункове значення діапазонів номінальних напружень, $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}$, рекомендовано визначати за формулами (7.1) та (7.2):

для номінального напруження:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \dots \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k) \quad (7.1)$$

для модифікованого номінального напруження:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}^* = K_{gt}\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e} \quad (7.2)$$

де $\Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k)$ — діапазон напружень, викликаних

втомлювальними навантаженнями, зазначеними в EN 1991 (усі частини);

λ_i — коефіцієнти еквівалентної пошкоджуваності в залежності від умов навантаження, характеристик конструкції та інших важливих чинників;

K_{gt} — коефіцієнт концентрації напружень, що враховує локальне збільшення напружень відповідно до геометрії деталей, які не включені в базову криву втомної міцності, див. 7.3.2.1.

Примітка 1. Значення λ_i може бути наведено в національному додатку.

Примітка 2. Значення λ_i для сталевих елементів можуть бути не застосовні до алюмінієвих елементів.

8 ВТОМНА МІЦНІСТЬ ТА КАТЕГОРІЇ ДЕТАЛЕЙ

8.1 Категорії деталей

8.1.1 Загальні положення

(1) Перевірка втомної міцності має ґрунтуватися на значеннях міцності ряду стандартизованих категорій деталей.

(2) Категорію деталі дозволено складати з однієї або декількох часто використовуваних і класифікованих деталей конструкції. Категорії деталей слід визначати за їхньою базовою втомною міцністю та відповідним значенням зворотного нахилу основної частини лінеаризованого співвідношення $\Delta\sigma - N$, і мають відповідати положенням пункту 8.2.

8.1.2 Чинники, що впливають на категорію деталей

(1) Під час визначення втомної міцності деталей конструкцій рекомендовано враховувати наступні чинники:

а) напрямок коливань напружень відносно деталі конструкції;

- b) місце розташування первинної тріщини в деталі конструкції;
- c) геометричне розташування та відносна пропорція деталі конструкції.

Примітка. Втомна міцність залежить від нижченаведених чинників:

- a) форма виробу;
- b) матеріал (за винятком зварних виробів);
- c) спосіб виготовлення;
- d) рівень якості (у випадку зварних швів і виливків);
- e) тип з'єднання.

8.1.3 Деталі конструкцій

(1) Деталі конструкцій можна розділити на наступні три основні групи:

- a) нерозрізні елементи, зварні елементи та болтові з'єднання;
- b) клейові з'єднання;
- c) лиття.

Примітка 1. Вказівки щодо категорій деталей і конструктивних елементів із залежністю $\Delta\sigma - N$ для втомної міцності елементів групи a), які зазнають впливу температури навколишнього середовища і не потребують захисту поверхні (див. Таблицю 8.2), наведено в Додатку J.

Примітка 2. У національному додатку може бути визначено набір категорій деталей і конструктивних елементів разом з набором критеріїв відповідності для таких елементів, зважаючи на положення 8.1.2 і 8.3.

Примітка 3. Окрім конструктивних деталей, наведених у додатку J, національним додатком можуть бути передбачені інші деталі конструкцій.

Примітка 4. Вказівки щодо виливків наведено в Додатку I.

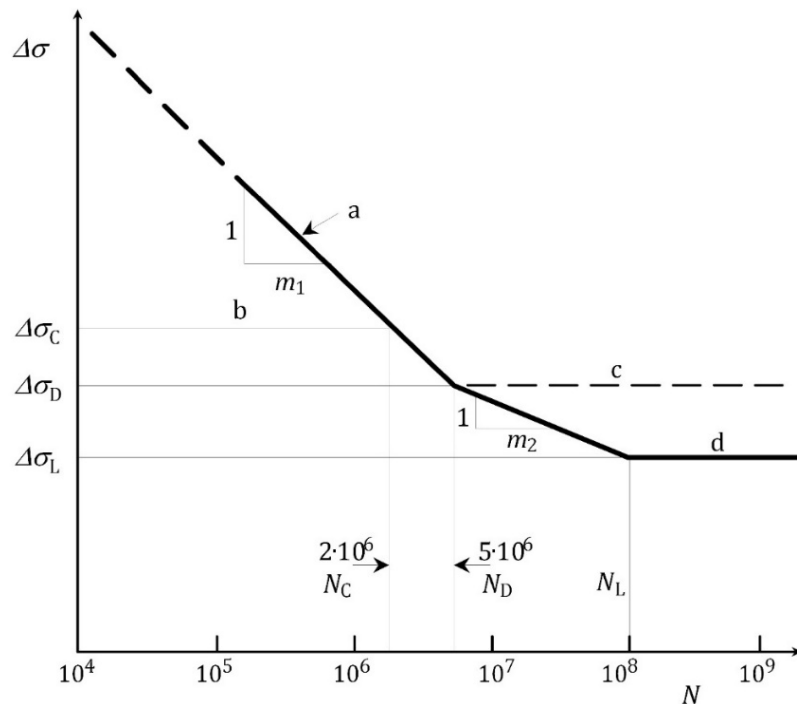
Примітка 5. Вказівки щодо клейових з'єднань див. у Додатку E.

8.2 Характеристики міцності при втомі

8.2.1 Класифіковані деталі конструкцій

(1) Узагальнена форма залежності $\Delta\sigma - N$ має бути такою, як показано на рисунку 8.1.

Примітка. Рисунок 8.1 побудовано в логарифмічному масштабі, а крива втомної міцності є середньою лінією мінус два середньоквадратичних відхили від експериментальних даних.



Умовні позначки:

a — крива втомної міцності; c — межа втоми з постійною амплітудою;
 b — базова втомна міцність; d — гранична межа

Рисунок 8.1 — Крива міцності при втомі $\log \Delta\sigma \cdot \log N$

(2) Розрахункову залежність втоми для витривалості в діапазоні від 10^5 до 5×10^6 циклів рекомендовано визначати за формулою (8.1):

$$N_i = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{FF} \gamma_{Mf}} \right)^{m_1} \quad (8.1)$$

де N_i — прогнозована кількість циклів до руйнування в діапазоні напружень $\Delta\sigma_i$;

$\Delta\sigma_C$ — базове значення втомної міцності при 2×10^6 циклах,

залежно від категорії деталі, зі стандартизованими значеннями, наведеними для довідки в таблиці 8.1;

$\Delta\sigma_i$ — діапазон постійних напружень для головних напружень у деталі конструкції для n_i циклів;

m_1 — зворотний нахил кривої втомної міцності, що залежить від категорії деталі конструкції;

γ_{Ff} — частковий коефіцієнт для невизначеностей у спектрі навантаження та аналізу реакції;

γ_{Mf} — частковий коефіцієнт для матеріалів та виготовлення.

Примітка 1. Значення γ_{Ff} див. у 4.4.

Примітка 2. Значення, наведені в L.6 для конкретних деталей конструкцій і в Додатку Е для клейових з'єднань, доцільно приймати як часткові коефіцієнти γ_{Mf} для проєктування, якщо тільки в національному додатку не наведено інші значення.

Таблиця 8.1 — Стандартизовані значення $\Delta\sigma_C$ (Н/мм²)

140, 125, 112, 100, 90, 80, 71, 63, 56, 50, 45, 40, 36, 32, 28, 25, 23, 20, 18, 16, 14, 12
--

(3) Для N_D за певних умов впливу навколишнього середовища має бути виконано пункт 8.4.

(4) Розрахункову залежність втоми для витривалості в діапазоні від 5×10^6 до 10^8 циклів рекомендовано визначати за формулою (8.2):

$$N_i = 5 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff}\gamma_{Mf}} \right)^{m_2} \left(\frac{2}{5} \right)^{\frac{m_2}{m_1}} \quad (8.2)$$

(5) Цикли напружень постійної амплітуди нижче межі втоми за постійною амплітудою $\Delta\sigma_D$, що становить 5×10^6 циклів (для основного матеріалу — 2×10^6 циклів), можна вважати такими, що не викликають пошкоджень.

(6) У випадку циклів напруження зі змінною амплітудою, оскільки

випадкові цикли, що перевищують постійну амплітудну межу втоми, можуть спричинити поширення тріщин, внаслідок чого цикли з меншою амплітудою стають руйнівними, зворотний логарифмічний нахил базових кривих втомної міцності між 5×10^6 і 10^8 циклами має бути змінений на m_2 для умов дії загального спектра, де $m_2 = m_1 + 2$.

Примітка. Використання константи оберненого нахилу $m_2 = m_1 + 2$ може бути доцільним для деяких спектрів.

(7) Будь-які цикли напружень нижче граничної межі $\Delta\sigma_L$, прийнятої на рівні 10^8 циклів, можна вважати такими, що не викликають пошкоджень.

Примітка. Для діапазонів напружень, прикладених менш ніж 10^5 разів, значення міцності згідно Рисунку 8.1 можуть бути занадто низькими для певних деталей конструкцій. Норми розрахунку на втому для витривалості менше 10^5 циклів може бути наведено в національному додатку. Відповідні вказівки наведено в Додатку F.

(8) У діапазоні між 10^3 і 10^5 циклами навантаження має бути проведена перевірка того, що розрахунковий діапазон напружень не призводить до максимального напруження розтягу, яке перевищує інші розрахункові значення міцності за граничним станом для деталі конструкції, див. EN 1999-1-1:2023.

(9) Категорії деталей застосовні до всіх значень середнього напруження, якщо не вказано інше.

Примітка. Щоб отримати рекомендації щодо підвищених значень втомної міцності для значень напружень на стиск або низьких напружень на розтяг див. Додаток G.

(10) Для плоских елементів при напруженнях згину, де $\Delta\sigma_1$ і $\Delta\sigma_2$ (див. рисунок 8.2) мають протилежні знаки, відповідне значення втомного напруження для певних типів деталей можна збільшувати на

одну або дві категорії деталей згідно з Таблицею 8.1 для $t \leq 15$ мм.

Примітка. Тип деталі та діапазон товщини, для якого може бути дозволено збільшення значень втомних напружень, а також кількість категорій, може бути наведено в національному додатку.

(11) З метою визначення кінцевого діапазону категорій деталей і забезпечення можливості збільшення або зменшення категорії деталі на постійний геометричний інтервал, рекомендовано використовувати стандартний діапазон значень $\Delta\sigma_C$, наведений у Таблиці 8.1.

Примітка. Збільшення (або зменшення) на одну категорію деталей означає вибір наступного більшого (або меншого) значення $\Delta\sigma_C$, залишаючи m_1 і m_2 незмінними. Це не стосується клейових з'єднань.

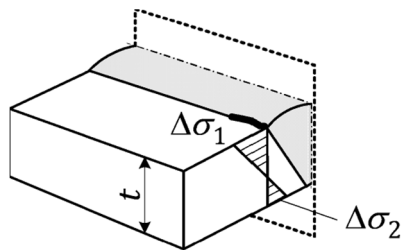


Рисунок 8.2 — Плоский елемент під дією згинальних напружень

8.2.2 Некласифіковані деталі конструкцій

(1) Деталі, які не повністю охоплено відповідною категорією деталей, рекомендовано оцінювати з посиланням на опубліковані дані, якщо вони доступні. В якості альтернативи можна виконувати приймально-здавальні випробування на втому.

Примітка. Настанови щодо випробувань на втому наведено у Додатку С.

8.2.3 Клейові з'єднання

(1) Втомна міцність клейових з'єднань має ґрунтуватися на даних випробувань, характерних для конкретного випадку застосування, з урахуванням відповідних впливів навколишнього середовища.

Примітка. Вказівки щодо проєктування клейових з'єднань наведено в Додатку Е.

8.2.4 Визначення базових значень міцності в «гарячих точках»

(1) Розрахункові значення базової міцності «гарячої точки» мають бути співставлені з використанням методом розрахунку «гарячої точки», оскільки це впливає на розрахункові напруження в «гарячій точці».

Примітка. Додаток К містить вказівки щодо методу розрахунку базової «гарячої точки» деталі. Додаток К можна використовувати в поєднанні з додатком J для визначення базових значень міцності в «гарячій точці».

8.3 Вплив середнього напруження

8.3.1 Загальні положення

(1) Оскільки дані про втомну міцність, наведені в таблицях категорій деталей, належать до умов високого середнього напруження при розтязі, коли середнє напруження стискає або має низьке значення при розтязі, втомну довговічність можна збільшувати за відповідних умов.

Примітка. Додаткові вказівки наведено в додатку G.

8.3.2 Основний матеріал і механічні з'єднання

(1) Якщо до прикладених напружень додати вплив залишкових напружень розтягу та напружень від нещільного прилягання, можна застосовувати коефіцієнт посилення втоми.

Примітка. Для отримання рекомендацій див. додаток G.

8.3.3 Зварні з'єднання

(1) Середнє напруження у зварних з'єднаннях не рекомендовано враховувати, за винятком наступних випадків:

а) якщо було проведено випробування, які відображають справжній кінцевий напружений стан (включно з залишковими напруженнями та напруженням непровару) в даному типі з'єднання, і демонструють послідовне збільшення втомної міцності зі зменшенням середнього напруження;

б) якщо буде використано методи підвищення втомної міцності, які, як було доведено, призводять до виникнення залишкових стискальних напружень, і якщо прикладені напруження не мають такої величини, щоб стискальні залишкові напруження зменшилися за рахунок деформації під час експлуатації.

Примітка. Для отримання рекомендацій див. додаток G.

8.3.4 Клейові з'єднання

(1) Позитивним впливом середнього напруження рекомендовано нехтувати, якщо це не підтверджено випробуваннями.

8.3.5 Діапазон малоциклової витривалості

(1) Для окремих деталей конструкцій можна застосовувати вищі границі втомної міцності при від'ємному відношенні мінімального до максимального напруження R , для $N < 10^5$ циклів.

Примітка. Для отримання вказівок див. додаток G.

8.3.6 Визначення кількості циклів для розрахунку R -відношення

(1) Метод отримання максимального, мінімального і середнього напруження для окремих циклів у спектрі з використанням методу

«резервуара» має відповідати додатку А, рисунок А.2.

8.4 Вплив навколишнього середовища

(1) Для певних умов впливу навколишнього середовища на деталі із алюмінієвих сплавів, номер категорії деталі, присвоєний деталі конструкції, має бути знижений.

Примітка. Для категорій деталей у Додатку J у Таблиці 8.2 наведено кількість категорій деталей (див. також Таблицю 8.1), на яку вони можуть бути знижені залежно від умов впливу навколишнього середовища та сплаву.

(2) Дані щодо втомної міцності, наведені в цьому стандарті, не рекомендовано застосовувати за температури навколишнього середовища понад 65°C або понад 30°C у морському середовищі, якщо не передбачено ефективного запобігання корозії.

Таблиця 8.2 (NDP) — Кількість категорій деталей, на які рекомендовано зменшити $\Delta\sigma_C$ відповідно до умов впливу навколишнього середовища на деталі із алюмінієвих сплавів

Матеріал			Умови впливу навколишнього середовища				
Серія сплавів	Основний склад	Ступінь захисту (див. EN 1999-1-1:2023)	Атмосферні			Підводні	
			C1—C4	C5	CX ^b	Im1	Im2 ^b
3xxx	Al Mn	A	0	(P) ^a	0	0	0
5xxx	Al Mg	A	0	(P) ^a	0	0	0
5xxx	Al Mg Mn	A	0	(P) ^a	0	0	1
6xxx	Al Mg Si	B	0	(P) ^a	1	0	2
7xxx	Al Zn Mg	C	0	(P) ^a	2	1	3
Примітка. Для категорій деталей < 25 Н/мм ² пониження не потрібне.							
^a (P) істотно залежить від умов впливу навколишнього середовища; може знадобитися регулярний захист, щоб уникнути ризику локального впливу навколишнього середовища, який може бути особливо шкідливим при появі тріщин.							
^b Значення N_D має бути збільшене з 5×10^6 до 10^7 циклів.							

8.5 Методи підвищення втомної міцності

(1) Дозволено використовувати методи підвищення втомної міцності певних зварних деталей конструкцій.

Примітка. Методи підвищення втомної міцності, як правило, є дорогими у застосуванні та створюють труднощі з контролем якості. На них не можна покладатися в загальних цілях проєктування, за винятком випадків, коли втома особливо критична для загальної економічності конструкції, і в цьому випадку слід звернутися за консультацією до фахівця. Їх частіше використовують щоб подолати існуючі недоліки проєктування. Рекомендації наведено в додатку Н.

ДОДАТОК А

(нормативний)

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ

А.1 Застосування цього додатка

(1) Цей нормативний додаток містить додаткові положення до 4.1, 7.7 та 8.3. щодо основних принципів розрахунку втомної міцності.

А.2 Сфера та область застосування

(1) Цей нормативний додаток містить положення щодо впливу втоми на конструкцію, механізм руйнування, потенційні місця втомного тріщиноутворення, умов схильності до втоми, проєктування безпечного ресурсу та стійкості до пошкоджень.

А.3 Загальні положення

А.3.1 Вплив втоми на проєктування

(1) Конструкції, що зазнають часто повторюваних експлуатаційних навантажень, можуть бути схильні до руйнування від втоми і їх потрібно перевірити на наявність цього граничного стану.

(2) Ступінь відповідності критеріям граничного або експлуатаційного стану, наведеним в EN 1999-1-1:2023, не рекомендовано використовувати як міру ризику втомного руйнування (див. А.3.3).

(3) Ступінь, до якого втома може впливати на проєктне рішення, рекомендовано встановлювати на концептуальній стадії проєктування. Щоб отримати достатню точність у прогнозуванні безпеки від втомного руйнування:

а) має бути зроблено реалістичне прогнозування повної послідовності експлуатаційних навантажень протягом усього розрахункового строку експлуатації;

b) пружна реакція конструкції під дією прогнозованих навантажень має бути оцінена з достатньою точністю;

c) проектування конструктивних деталей та характеристика методів виробництва та контролю якості мають бути виконані з більшою увагою і ретельністю, ніж під час проектування для інших граничних станів, оскільки ці питання можуть мати значний вплив на втомну міцність і вимагають суворого контролю.

Примітка. Інформацію щодо вимог до виконання наведено у EN 1090-3.

A.3.2 Механізм руйнування

(1) Рекомендовано припустити, що втомне руйнування зазвичай починається в точці з високим напруженням (через раптову зміну геометрії, залишкове напруження при розтязі або гострі тріщиноподібні розриви), і що втомні тріщини будуть поступово розширюватися при зміні навантажень і напружень, хоча вони зазвичай залишаються стабільними при постійному навантаженні, що призводить до руйнування, якщо залишився поперечний переріз, який недостатній для сприйняття діючого пікового навантаження.

(2) Рекомендовано припустити, що втомні тріщини поширюються приблизно під прямим кутом до напрямку максимального діапазону головних напружень і що швидкість поширення зростає експоненційно, незважаючи на те, що на ранніх стадіях вони є повільними, а протягом більшої частини свого життя непомітними. Рекомендовано визнати пов'язані з цим проблеми виявлення втомних тріщин в процесі експлуатації.

A.3.3 Потенційні місця утворення тріщин при втомі

(1) Рекомендовано розглянути наступні місця зародження втомних тріщин, пов'язаних з зазначеними конструкційними особливостями:

- a) краї та корені зварних швів;
- b) оброблені кути;
- c) перфоровані або просвердлені отвори;
- d) зрізані або відпиляні кромки;
- e) поверхні, що перебувають під високим контактним тиском («фреттинг»);
- f) корені кріпильних різьбових з'єднань.

(2) У відповідних випадках рекомендовано також враховувати наступні чинники, що можуть призвести до виникнення втомних тріщин:

- a) розриви матеріалу або дефекти зварного шва;
- b) зазубрини або задири від механічних пошкоджень;
- c) осередки корозії.

A.3.4 Умови схильності до втоми

(1) Під час оцінювання ймовірної схильності до втоми рекомендовано враховувати наступне:

a) високе співвідношення динамічного та статичного навантаження — рухомі або підйомні конструкції, такі як наземні або морські транспортні засоби, крани і т.д., більш схильні до проблем втоми, ніж нерухомі конструкції, якщо тільки останні не сприймають переважно рухомі навантаження, як у випадку з мостами;

b) часте прикладання навантаження, що призводить до великої кількості циклів протягом розрахункового строку експлуатації. Тонкі конструкції або елементи з низькими власними частотами особливо схильні до резонансу і збільшення динамічних напружень, навіть якщо статичні розрахункові напруження є низькими. Конструкції, що піддані переважно вітровому або хвильовому впливу, а також конструкції, що підтримують технологічне обладнання, рекомендовано ретельно перевіряти на наявність резонансних ефектів;

- c) застосування зварювання, оскільки деякі часто

використовувані зварні деталі мають низьку втомну міцність. Це стосується не тільки з'єднань між елементами, але й будь-якого кріплення до навантаженого елемента, незалежно від того, чи вважається отримане з'єднання «несним» чи ні;

d) складність деталей з'єднання, оскільки складні з'єднання часто призводять до високої концентрації напружень через локальні зміни жорсткості вздовж траєкторії навантаження. Хоча це часто мало впливає на граничну статичну міцність з'єднання, це може мати серйозний вплив на втомну міцність. Якщо втома є домінуючим чинником, форма поперечного перерізу елемента має бути обрана такою, щоб забезпечити плавність і простоту конструкції з'єднання, щоб можна було з упевненістю розрахувати напруження і забезпечити відповідні стандарти виготовлення та контролю;

e) певні умови термічного та хімічного впливу, які можуть знизити втомну міцність, якщо поверхня металу незахищена.

A.4 Метод безпечного ресурсу

A.4.1 Загальні положення

(1) Проєктування за методом безпечного ресурсу ґрунтується на розрахунку накопичення пошкоджень протягом розрахункового строку експлуатації конструкції або на порівнянні діапазону максимальних напружень з межею постійної амплітуди, використовуючи стандартні дані про нижню межу витривалості та верхню межу втомного навантаження, що ґрунтуються на проєктних значеннях.

Примітка 1. Цей метод дає консервативну оцінку втомної міцності і, як правило, не залежить від перевірок в процесі експлуатації на наявність втомних пошкоджень.

Примітка 2. Варіанти, що враховують перевірку в процесі експлуатації, наведено в L.1 для випадків застосування даних щодо міцності, наведених в Додатку J.

(2) Розрахунок на втому передбачає прогнозування історії напружень у потенційних місцях зародження тріщин з подальшим підрахунком циклів навантаження з відповідними діапазонами напружень і складанням спектрів напружень. На основі цієї інформації виконують оцінку розрахункового строку експлуатації з використанням відповідних даних про діапазон напружень витривалості для відповідної деталі конструкції. Цей метод наведено в А.4.

(3) Підхід до розрахунку безпечного ресурсу дозволено виконувати за однією з двох процедур для забезпечення достатньої міцності елемента або конструкції. Процедури, відповідно, засновані на:

- а) концепції лінійного накопичення пошкоджень, див. (4);
- б) концепції еквівалентного діапазону напружень, див. (5).

Примітка. Третю процедуру для випадку, коли всі розрахункові діапазони напружень менші за розрахункову границю втоми за постійною амплітудою, наведено в L.3.1 (3).

(4) Для розрахунку безпечного ресурсу на основі концепції лінійного накопичення пошкоджень (накопичення пошкоджень Майнера) значення пошкоджень D_L для всіх циклів має відповідати умовам у формулах (A.1) або (A.2):

$$D_{L,d} \leq 1 \quad (A.1)$$

де $D_{L,d} = \sum n_i / N_i$ — розраховують відповідно до методики, наведеної в пункті А.4.

або

$$D_{L,d} \leq D_{lim} \quad (A.2)$$

де $D_L = \sum n_i / N_i$ — розраховано відповідно до методики, наведеної в пункті А.4, із $\gamma_{Mf} = \gamma_{Ff} = 1,0$.

Примітка. Значення D_{lim} — це значення, наведені в L.6, застосовні за

умови, що прийнято дані про міцність, наведені в Додатку J, якщо національний додаток не містить інших значень.

(5) Якщо розрахунок базується на підході еквівалентного діапазону напружень ($\Delta\sigma_{E,2e}$), рекомендовано перевірити умову у формулі (A.3):

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (A.3)$$

Примітка. Значення γ_{Mf} — це значення, наведені в L.6, якщо тільки в національному додатку не вказано інші значення. Вказівки щодо γ_{Ff} див. у 4.4.

A.4.2 Передумови для розрахунку безпечного ресурсу

(1) Прогнозована історія експлуатації конструкції має бути доступна у вигляді послідовності та частоти навантаження. Як альтернатива, напруження у всіх потенційних місцях виникнення тріщин мають бути описані у термінах історії напружень.

(2) Характеристики втомної міцності у всіх потенційних місцях виникнення тріщин мають бути подані у вигляді кривих втомної міцності.

(3) Рекомендовано перевірити всі потенційні осередки виникнення втомних тріщин, що мають високий діапазон зміни напружень та/або значну концентрацію напружень.

(4) Стандарти якості, застосовані під час виготовлення складових частин конструкцій, які містять потенційні місця виникнення втомних тріщин, мають поширюватися й на основні конструкції.

A.4.3 Методологія розрахунку

(1) Базова процедура має бути наступною (див. рисунок A.1):

а) отримати верхню межу оцінки розподілу експлуатаційних навантажень для розрахункового строку експлуатації конструкції (див. 4.3);

b) оцінити результуючу історію напружень в місці потенційного виникнення тріщини, що перевіряється (див. A.4.5);

c) якщо застосовано номінальні напруження, модифікувати історію напружень в будь-якій області геометричної концентрації напружень, яка ще не включена в категорію деталей, шляхом застосування відповідного коефіцієнта концентрації напружень (див. 7.3.2);

d) звести історію напружень до еквівалентної кількості циклів (n_i) різних діапазонів напружень $\Delta\sigma_i$, використовуючи метод підрахунку циклів (див. A.4.5);

e) розташовувати цикли в порядку спадання діапазону $\Delta\sigma_i$, щоб сформувати спектр діапазонів напружень, де $i = 1, 2, 3$ тощо для першої, другої, третьої смуги в спектрі (див. A.4.5);

f) класифікувати деталь конструкції відповідно до заданого набору категорій деталей. Для відповідної категорії деталі та відповідного співвідношення $\Delta\sigma - N$ визначити для розрахункового діапазону напружень ($\Delta\sigma_i$) допустиму витривалість (N_i);

g) розрахувати сумарне значення пошкодження $D_{L,d}$, спричинене всіма циклами, на основі концепції лінійного накопичення пошкоджень за формулою (A.4):

$$D_{L,d} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (A.4)$$

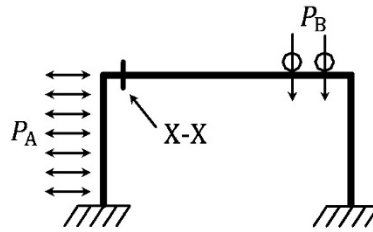
h) розрахувати безпечний ресурс T_S за формулою (A.5):

$$T_S = \frac{T_L}{D_{L,d}} \quad (A.5)$$

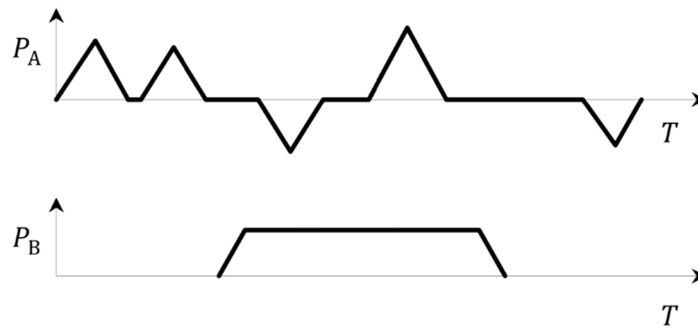
i) виконати одну або декілька з наступних дій, якщо значення T_S є меншим за T_L :

— повторно запроєктувати конструкцію або елемент, щоб зменшити рівень напружень;

— змінити деталь конструкції на вищу за категорією; застосувати метод допустимої пошкоджуваності, якщо це доречно (див. А.5).



а) Система, деталь конструкції X-X і завантаження

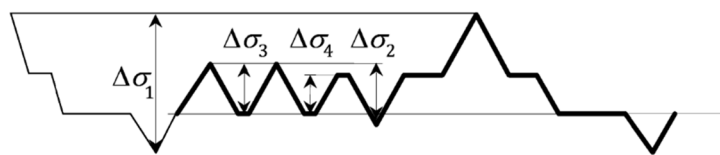


б) Типовий цикл навантаження (повторюється n разів при розрахунках).

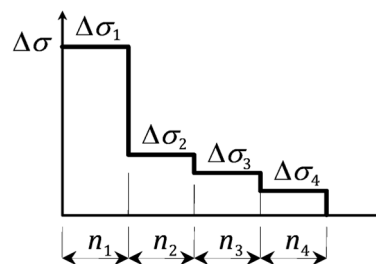
T = час



с) Історія напружень в деталі X-X

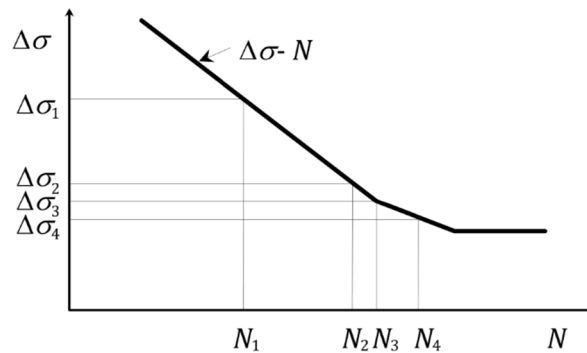


д) Підрахунок циклів, метод «резервуара»



е) Спектр діапазону напружень

Рисунок А.1 — Процедура оцінки втоми



- f) N_i дорівнює кількості циклів до руйнування на рівні діапазону напружень кривої втомної міцності для деталі конструкції X-X

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = D$$

- g) Підсумок пошкоджень, правило Майнера

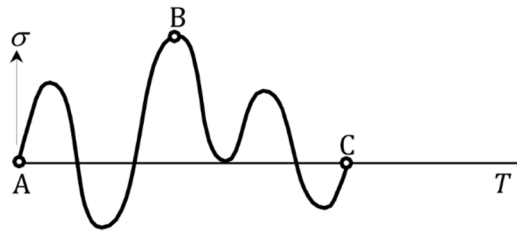
Рисунок А.1 — Аркуш 2

А.4.4 Обчислення кількості циклів

(1) Процедури підрахунку циклів рекомендовано використовувати щоб розділити складну історію напружень на зручний спектр циклів з огляду на діапазон напружень $\Delta\sigma$, кількість циклів напружень n та, за необхідності, коефіцієнт асиметрії циклу напружень R .

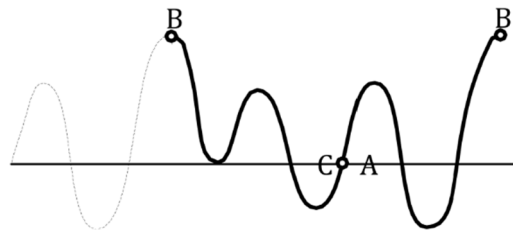
(2) Для коротких історій напружень, де прості випадки завантаження повторюються кілька разів, рекомендовано використовувати метод «резервуару». Його легко візуалізувати і він простий у використанні (див. рисунок А.2). Якщо застосовано довгі історії напружень, таких як ті, що отримані на основі виміряних деформацій в реальних конструкціях (див. Додаток С), рекомендовано використовувати метод «дощового потоку».

Примітка. Обидва методи підходять для комп'ютерного аналізу.

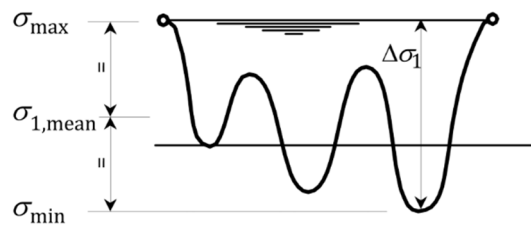


Крок 1 — Визначення історії напружень для випадку завантаження.

Визначення піку В

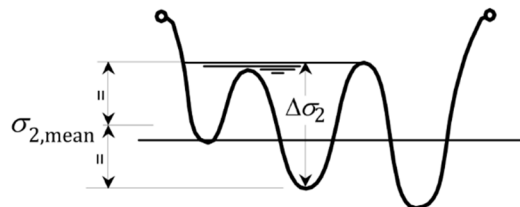


Крок 2 — Переміщення історії напружень зліва від піку В праворуч

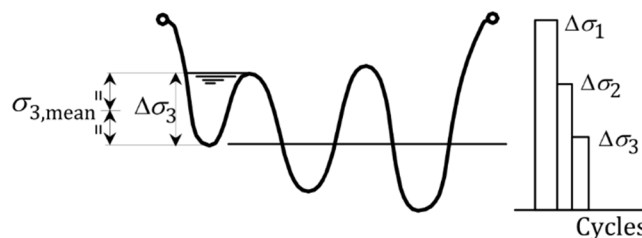


Крок 3 — Наповнення «резервуара» «водою». Найбільша глибина —

основний цикл



Крок 4 — «Зливання» на найбільшу глибину. Визначення нової максимальної глибини. Це другий за величиною цикл



Крок 5 — Далі повторення дот, поки не витече вся «вода». Сума всіх циклів є спектром напружень для наведеної вище історії

Рисунок А.2 — Підрахунок циклів методом «резервуару»

A.4.5 Визначення спектру напружень

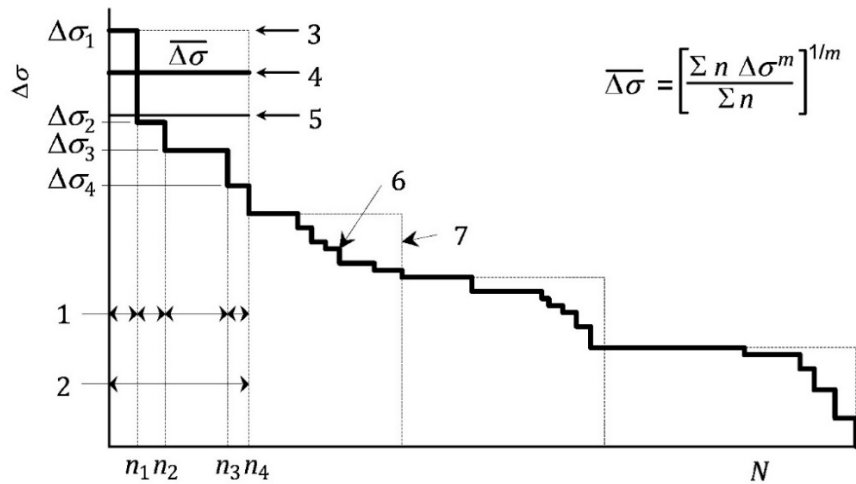
(1) Для зручності розрахунку складний спектр можна спростити до меншої кількості діапазонів.

Примітка 1. Перелік циклів у порядку спадання діапазону напружень, $\Delta\sigma$, призводить до отримання спектру напружень.

Примітка 2. Консервативний метод полягає в об'єднанні смуг у більші групи, що містять однакову загальну кількість циклів, але діапазон напружень яких дорівнює діапазону напружень найвищої смуги в групі.

Більш точно, середньозважене значення всіх смуг в одній групі можна розрахувати за допомогою показника ступеня m , де m — це зворотний нахил кривої $\Delta\sigma - N$, який найчастіше використовується (див. рисунок A.3).

Примітка 3. Використання середнього арифметичного значення завжди буде неконсервативним.



Умовні позначки:

- | | |
|------------------------------|--|
| 1 — оригінальні смуги; | 5 — середнє арифметичне |
| 2 — спрощена смуга; | (неконсервативне); |
| 3 — пік (консервативний); | 6 — зареєстрований спектр; |
| 4 — середньозважене значення | 7 — спрощений спектр для проєктування; |
| (найбільш точне); | N — кумулятивна частота (будь-яка |
| | кількість циклів); |
| | $\Delta\sigma$ — діапазон напружень |

Рисунок А.3 — Спрощений спектр діапазону напружень

A.5 Метод допустимої пошкоджуваності

A.5.1 Передумови проєктування за допустимою пошкоджуваністю

(1) Конструкцію, стійку до пошкоджень, рекомендовано використовувати лише за таких умов:

- a) місця виникнення втомних тріщин розташоване на поверхні або поблизу поверхні, яка є легкодоступною під час експлуатації;
- b) доступні практичні методи контролю, які здатні виявити тріщини та виміряти їх протяжність задовго до того, як вони досягнуть критичного руйнівного розміру (див. п. 4.5.5);
- c) процедура, наведена в А.5.3, застосовна для визначення мінімальної частоти огляду і максимально допустимого розміру тріщин

до необхідності ремонту;

Примітка. Альтернативний метод визначення частоти перевірок наведено в L.4 і L.5 для випадків, коли застосовано дані втомної міцності, наведені в Додатку J.

(2) Посібник з технічного обслуговування має містити інформацію, перераховану в пункті 4.5.5, для кожного потенційного місця виникнення тріщини.

A.5.2 Настанови із застосування методу допустимої пошкоджуваності

(1) Наступні настанови мають бути враховані при застосуванні методу допустимої пошкоджуваності:

- деталі, матеріали та рівні напружень мають бути обрані таким чином, щоб у випадку утворення тріщин була низька швидкість поширення тріщин та їх значна критична довжина;

- там, де це можливо, має бути прийнята така конструктивна схема, при якій у випадку втомного пошкодження може відбутися перерозподіл напружень від діючого навантаження або в межах конструкції загалом, або в межах поперечного перерізу окремого елемента (принцип статичної невизначеності);

- рекомендовано застосовувати тріщиностійкі деталі;

- рекомендовано забезпечувати легкодоступність критично важливих компонентів і деталей для огляду під час регулярних перевірок;

- рекомендовано забезпечувати можливість контролювання розміру тріщин за допомогою моніторингу або, у разі необхідності, легко ремонтувати чи замінювати компоненти.

А.5.3 Стратегії перевірок за методом допустимої пошкоджуваності

(1) На кожній потенційній ділянці утворення тріщин, де безпечний ресурс, T_S , розрахований відповідно до формули (А.5), є меншим за проєктний ресурс, T_L , має бути розрахована періодичність проведення інспекцій, T_i .

(2) У настановах з технічного обслуговування має бути зазначено, що перша інспекція кожного потенційного місця утворення тріщин має проводитися до закінчення безпечного ресурсу.

(3) У настановах з технічного обслуговування має бути зазначено, що наступні перевірки мають проводитися через регулярні інтервали часу T_i відповідно до формули (А.6):

$$T_i \leq 0,5T_f \quad (\text{А.6})$$

де T_f — розрахунковий час, за який тріщина, що виникла на оцінюваній ділянці, зростає від видимої поверхневої довжини, l_d , до критичної довжини руйнування, l_f (див. рисунок А.4).

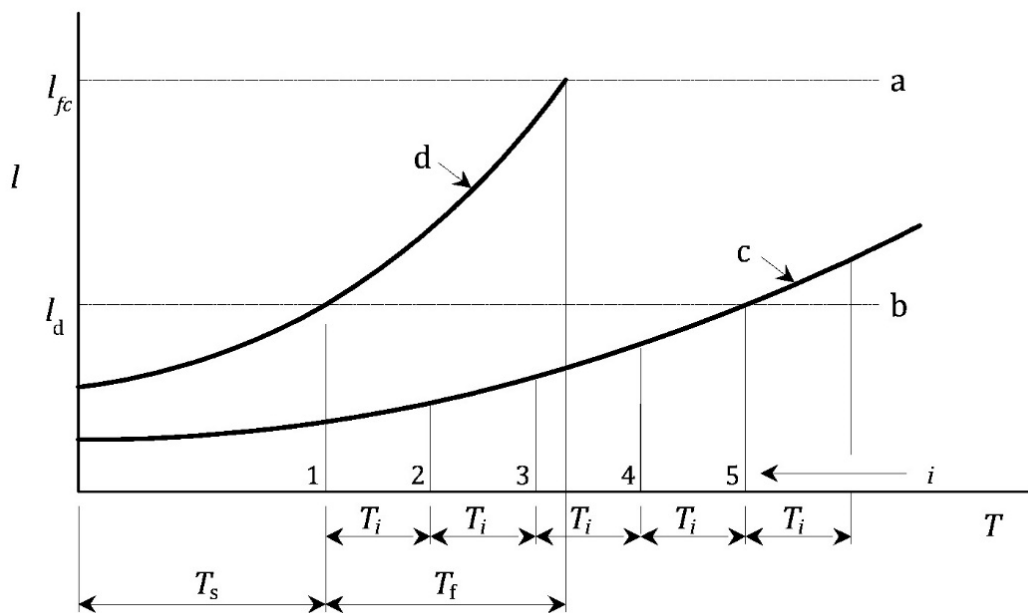


Рисунок А.4 — Стратегії перевірок за методом допустимої пошкоджуваності

Умовні позначки:

a — критична довжина руйнування;

b — передбачувана мінімальна довжина, яку можна виявити;

c — фактична крива росту;

d — передбачувана найшвидша крива росту;

i — номер перевірки;

T_i — інтервал перевірок;

T_S — інтервал часу, при якому можна виявити довжину тріщини;

T_f — інтервал часу для росту від виявленої до критичної довжини тріщини

Примітка. Граничні умови для кривої d наведено в Додатку В.

Рисунок А.4 — Аркуш 2

(4) Під час визначення мінімальної видимої довжини поверхневої тріщини рекомендовано враховувати доступність, розташування, ймовірний стан поверхні та метод обстеження. Якщо не буде проведено спеціальних випробувань, які продемонструють, що коротші тріщини можуть бути виявлені з імовірністю, що перевищує 90%, прийняте значення l_d має бути не меншим за рекомендоване значення в Таблиці А.1, якщо повна довжина тріщини є доступною для обстеження.

Таблиця А.1 — Рекомендовані безпечні значення довжини поверхневої тріщини, що можливо виявити, l_d в мм

Метод перевірки	Розташування тріщини		
	Рівна гладка поверхня	Необроблена поверхня, верхній валик шва	Гострий кут, кромка зварного шва
Візуальний, зі збільшувальним приладом	20	30	50
Випробування на проникнення рідин	5	10	15

Примітка. Наведені вище значення передбачають безпосередній доступ, належне освітлення та видалення поверхневих покриттів.

(5) Якщо будь-який несний або ненесний конструктивний елемент перешкоджає повному доступу до тріщини, приховану довжину тріщини рекомендовано додати до відповідного значення в таблиці A.1, щоб отримати значення l_d для потреб розрахунку.

(6) Якщо конструкція має велику товщину і місце зародження тріщини розташоване на важкодоступній поверхні (наприклад, корінь одностороннього стикового зварного шва в трубчастому елементі), рекомендовано передбачити технологію обстеження на базі ультразвукового методу контролю якості для виявлення та вимірювання тріщин до того, як вони досягнуть поверхні, доступної до огляду. Таку технологію не рекомендовано застосовувати без належного обґрунтування та оцінки вартості.

(7) Значення l_f має бути таким, щоб переріз «нетто», враховуючи ймовірну форму профілю тріщини по товщині, був здатний витримати максимальне статичне зусилля розтягу під дією розрахункового руйнівного навантаження, розрахованого відповідно до EN 1999-1-1:2023, без нестабільного поширення тріщини.

(8) Інтервал часу для росту тріщини від довжини тріщини, яку можна виявити, до критичної довжини тріщини, T_f , рекомендовано оцінювати за допомогою розрахунку та/або випробування, припускаючи комбінації впливів граничних станів за несною здатністю, наступним чином:

а) метод розрахунку має ґрунтуватися на принципах механіки руйнування.

Примітка 1. Для рекомендацій див. додаток B.

Рекомендовано використовувати верхню межу, визначену як середнє значення плюс два середньоквадратичних відхили для співвідношення швидкості росту тріщини. Альтернативно, конкретні дані щодо росту тріщини можуть бути отримані зі стандартних зразків,

виготовлених з того самого матеріалу, що й на шляху поширення тріщини. У такому випадку швидкість росту тріщини має бути врахована відповідно до коефіцієнту випробування на втому, F .

Примітка 2. Настанови наведено у таблиці С.1.

б) якщо ріст тріщини отримано в результаті випробувань конструкції або елементів, що моделюють відповідні матеріали, геометрію і спосіб виготовлення, до зразка для випробування рекомендовано застосувати відповідну схему прикладання зусиль (див. Додаток С);

Примітка 3. Настанови наведено у додатку С.

с) швидкості росту тріщин, зареєстровані між довжинами тріщин l_d та l_f , мають бути враховані коефіцієнтом випробування на втому F .

Примітка 4. Вказівки наведено у таблиці С.1.

(9) Настанови з технічного обслуговування мають визначати дії, які необхідно вжити у разі виявлення втомної тріщини під час регулярного технічного огляду, а саме:

а) якщо виміряна довжина тріщини менша за l_d , ремонтні роботи можна не проводити;

б) якщо виміряна довжина тріщини дорівнює або перевищує l_d , елемент конструкції рекомендовано оцінити на предмет придатності до експлуатації, щоб визначити, як довго конструкцію можна безпечно експлуатувати без ремонту або заміни цього елемента. У разі продовження експлуатації рекомендовано розглянути можливість збільшення частоти обстежень на відповідній ділянці;

с) якщо виміряна довжина тріщини перевищує l_f , конструкцію рекомендовано негайно вивести з експлуатації.

прДСТУ EN 1999-1-3:202X

Примітка. Подальші вказівки наведено в додатку L для використання за умови, що дані втомної міцності прийнято з Додатку J.

ДОДАТОК В

(довідковий)

НАСТАНОВИ ЩОДО ОЦІНКИ РОЗВИТКУ ТРІЩИН ЗА ДОПОМОГОЮ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

В.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає додаткові вказівки до А.5.3, С.6, L.4.3 щодо оцінювання росту тріщини за механікою руйнування.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього інформаційного додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, то його можна використовувати.

В.2 Сфера та область застосування

(1) Метою цього додатку є надання інформації про використання методів механіки руйнування для оцінювання росту втомних тріщин від гострих плоских розривів. Основне використання полягає в оцінюванні:

- відомих дефектів (включно з втомними тріщинами, виявленими в процесі експлуатації)
- передбачуваних дефектів (включно з оцінкою вихідних з'єднань або меж виявлення за допомогою неруйнівного контролю (НК));
- дефектостійкості (включно з оцінкою придатності до використання за призначенням, оцінку дефектів виготовлення для конкретних вимог до експлуатації).

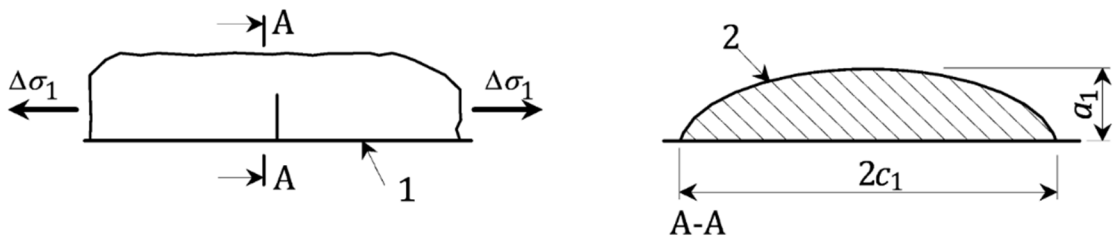
(2) Метод охоплює розвиток втомних тріщин, нормальних до напрямку головного напруження розтягу (Режим 1).

В.3 Принципи

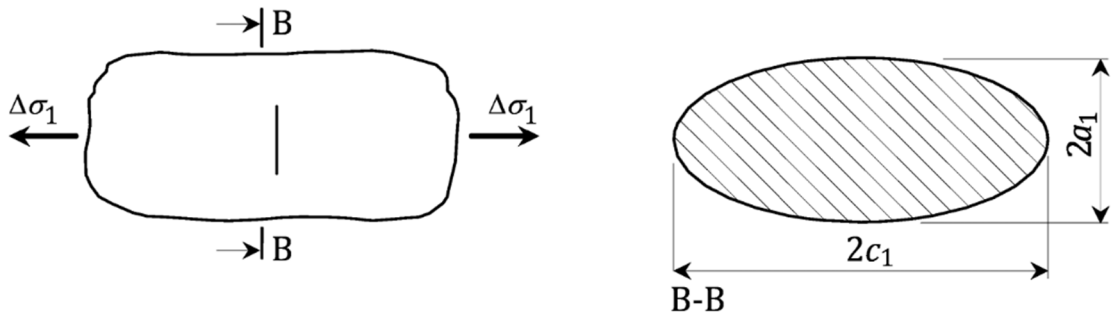
В.3.1 Розміри дефектів

(1) Приймається, що поширення втоми починається з попередньо існуючого плоского дефекту з гострим фронтом тріщини, орієнтованим по нормалі до напрямку основного діапазону напружень розтягу $\Delta\sigma$ в цій точці.

(2) Розміри попередньо існуючих дефектів показано на Рисунку В.1 в залежності від того, чи є вони поверхневими, чи повністю заглибленими в матеріал.



а) Поверхнева тріщина



б) Внутрішня тріщина

Умовні позначки:

1 — відкрита поверхня;

2 — тріщина.

Рисунок В.1 — Попередньо існуюча плоска тріщина

В.3.2 Залежність розвитку тріщин

(1) Під дією циклічного діапазону напружень $\Delta\sigma$ фронт тріщини буде рухатися вглиб матеріалу відповідно до закону розповсюдження

тріщини. У напрямку « a » рекомендовано використовувати швидкість розповсюдження, визначену за формулою (B.1):

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta\sigma a^{0.5} y)^m \quad (\text{B.1})$$

де A — стала матеріалу швидкості росту втомних тріщин (*fatigue crack growth rate; FCGR*);

m — показник швидкості росту тріщини;

y — коефіцієнт геометрії тріщини, що залежить від форми, орієнтації та розмірів поверхневої межі.

Примітка. Одиницями виміру коефіцієнтів інтенсивності напружень ΔK є $\text{Нмм}^{-2} \text{м}^{0.5} [\text{МПа}\text{м}^{0.5}]$, а для швидкості росту тріщини da/dN — $[\text{м/цикл}]$. Дані, наведені в B.4, дійсні тільки для цих одиниць.

(2) Формулу (B.1) можна переписати у вигляді формули (B.2):

$$\frac{da}{dN} = A\Delta K^m \quad (\text{B.2})$$

де ΔK — діапазон інтенсивності напружень, який дорівнює $\Delta\sigma a^{0.5} y$

(3) Після застосування N циклів діапазону напружень $\Delta\sigma$ тріщина виросте з розміру a_1 до розміру a_2 і має бути використана формула інтегрування (B.3):

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{A\Delta K^m} \quad (\text{B.3})$$

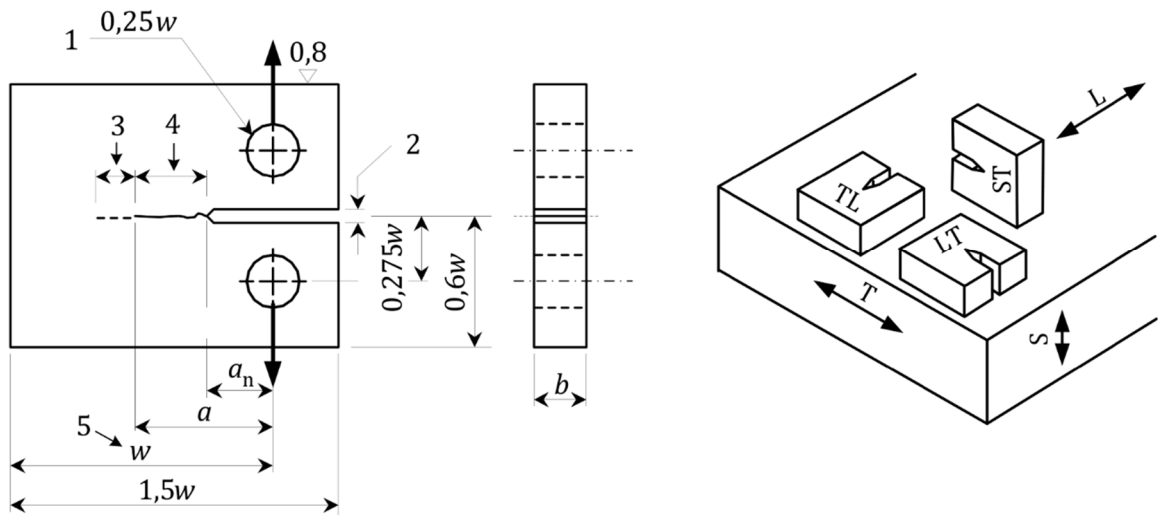
(4) У загальному випадку A , ΔK та m залежать від a .

B.4 Характеристики розкриття тріщин A та m

(1) A і m отримують з вимірювань росту тріщин на стандартних зразках з надрізами (наприклад, див. рисунок B.2), орієнтованих у напрямку LT, TL або ST, використовуючи стандартизовані методики випробувань. Конструкція зразка має бути такою, щоб можна було

точно визначити коефіцієнт інтенсивності напружень (K) (тобто залежність між прикладеним навантаженням і розміром тріщини « a »).

Примітка. Перша буква позначає напрямок, нормальний до площини тріщини, а друга — очікуваний напрямок поширення тріщини, де «L» означає поздовжній, «T» — поперечний і «S» — короткий поперечний, що вказує на напрям витягування або вальцювання.



Умовні позначки:

w — ефективна ширина зразка (відстань між центральною лінією отворів і задньою поверхнею пластини);

L — повздовжній напрям виготовлення (вальцювання або витягування);

1 — діаметр отвору;

2 — положення прорізу у верхній частині зразка;

3 — приріст;

4 — попередня втомна тріщина.

Рекомендована товщина $w/20 \leq b \leq w/4$

Рисунок В.2 — Типовий приклад росту тріщини

(2) Випробування проводять під комп'ютерним контролем циклічного навантаження на зразок, при постійному співвідношенні інтенсивності прикладених напружень $R = K_{\min}/K_{\max}$, для умов випробування з постійним R або постійним $K_{\max}$ і точним

вимірюванням росту тріщини від надрізу.

(3) Якщо отримано дискретні значення довжини тріщини a , до отриманих даних підбирають плавну криву, використовуючи метод, зазначений у стандарті на випробування. Швидкість росту тріщини, da/dN , при заданій довжині тріщини обчислюють як градієнт кривої за такого значення a .

(4) Відповідне значення діапазону коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK , отримують за допомогою відповідного значення K для експериментального зразка, а також діапазону прикладеного навантаження. Результати da/dN в залежності від ΔK будують з використанням логарифмічної шкали.

(5) Для загального використання можуть знадобитися криві росту тріщини для різних значень R . На Рисунку В.3 показано типовий набір кривих залежності da/dN від ΔK для екструдованого алюмінієвого сплаву EN AW-6005A T6. На Рисунку В.3 (а) умовою випробування було постійне співвідношення інтенсивності напружень $K_{\min}/K_{\max}$, а на рисунку В.3 (b) результат випробування при постійному значенні $K_{\max} = 10 \text{ Нмм}^{-2} \cdot \text{м}^{0,5}$ об'єднано з консервативними гілками кривих з рисунку В.3(а). Ця комбінація результатів за постійного R і постійного K є консервативним інженерним наближенням і може бути використана для прогнозування втомної довговічності у випадку високих залишкових напружень розтягу або оцінки коротких втомних тріщин. Значення m і A для рисунку В.3 наведено в Таблиці В.1.

(6) На рисунку В.4(а) зображено залежність R-FCGR для деформівних алюмінієвих сплавів при $R = 0,1$, а на рисунку В.4(b) додано відповідні дані для постійної величини $R = 0,8$. На рисунку В.5 показано набір кривих залежності R-FCGR для трьох сплавів кокільного лиття при $R = 0,1$ і $R = 0,8$. На рисунку В.6 подано комбіновані дані випробувань при постійній R і постійній $K_{\max}$.

деформівних алюмінієвих сплавів для $R = 0,1$ і $R = 0,8$. Значення m і A верхньої границі обвідних FCGR, показані на рисунках В.4 — В.6, наведено в таблицях В.2 — В.4, відповідно.

(7) Корозія може впливати на значення A і m . Дані випробувань, отримані за нормальної волого сті навколишнього середовища, будуть адекватними для більшості нормальних атмосферних умов.

В.5 Геометрична функція y

(1) Геометрична функція y залежить від геометрії тріщини (форми та розміру), граничних розмірів поверхні оточуючого матеріалу та характеру напружень в області траєкторії тріщини.

(2) Цю інформацію можна отримати за допомогою скінченно-елементного аналізу деталі конструкції з використанням елементів типу «вершина тріщини». Інтенсивність напружень для різних довжин тріщин можна розрахувати за допомогою процедури J -інтегралу. Також її можна обчислити на основі поля переміщень або напружень навколо вершини тріщини, або повної енергії пружної деформації.

(3) Альтернативним джерелом значень y є оприлюднені розв'язки для часто використовуваних геометричних форм (основного матеріалу та зварних з'єднань). Стандартні дані часто подають у вигляді Y , де $Y = y\pi^{-0,5}$. Типовий приклад поверхневої тріщини, що розриває плоску пластину, показаний на рисунку В.7(а). Якщо тріщина розташована біля шва на поверхні пластини, то додаткове коригування для врахування ефекту локальної концентрації напружень можна виконати за допомогою коефіцієнта збільшення M_K (див. рисунок В.7(б)).

(4) Добуток Y для простої пластини і M_K для зварного шва дає зміну y по мірі зростання тріщини через товщину матеріалу (див. рисунок В.7.(с)).

В.6 Інтегрування розвитку тріщини

(1) Для загального випадку історії напружень зі змінною амплітудою рекомендовано отримати спектр напружень (див. 4.2.1). На практиці повний спектр має бути застосований щонайменше в 10 ідентичних послідовностях з однаковими діапазонами напружень і R -відношень, але з однією десятою від кількості циклів. Блок з найбільшим діапазоном напружень рекомендовано застосовувати першим у кожній послідовності (див. рисунок А.3). Приріст тріщини розраховують за допомогою багатокутника росту тріщини для відповідного R -відношення для кожного блоку циклів напружень постійної амплітуди.

(2) В області зварних швів, якщо структура залишкових напружень не відома, рекомендовано використовувати або високе R -відношення ($R = 0,8$), або криву росту тріщини з постійною амплітудою $K_{\max}$.

(3) Довжина тріщини, a , на підставі цього інтегрується до тих пір, поки не буде досягнутий максимальний необхідний розмір тріщини a_2 і не будуть розраховані значення.

В.7 Оцінка максимального розміру тріщини a_2

(1) Максимальний розмір тріщини a_2 рекомендовано оцінювати на основі пластичного розриву перерізу «нетто» при максимальному прикладеному зусиллі розтягу з відповідним частковим коефіцієнтом, див. EN 1999-1-1:2023.

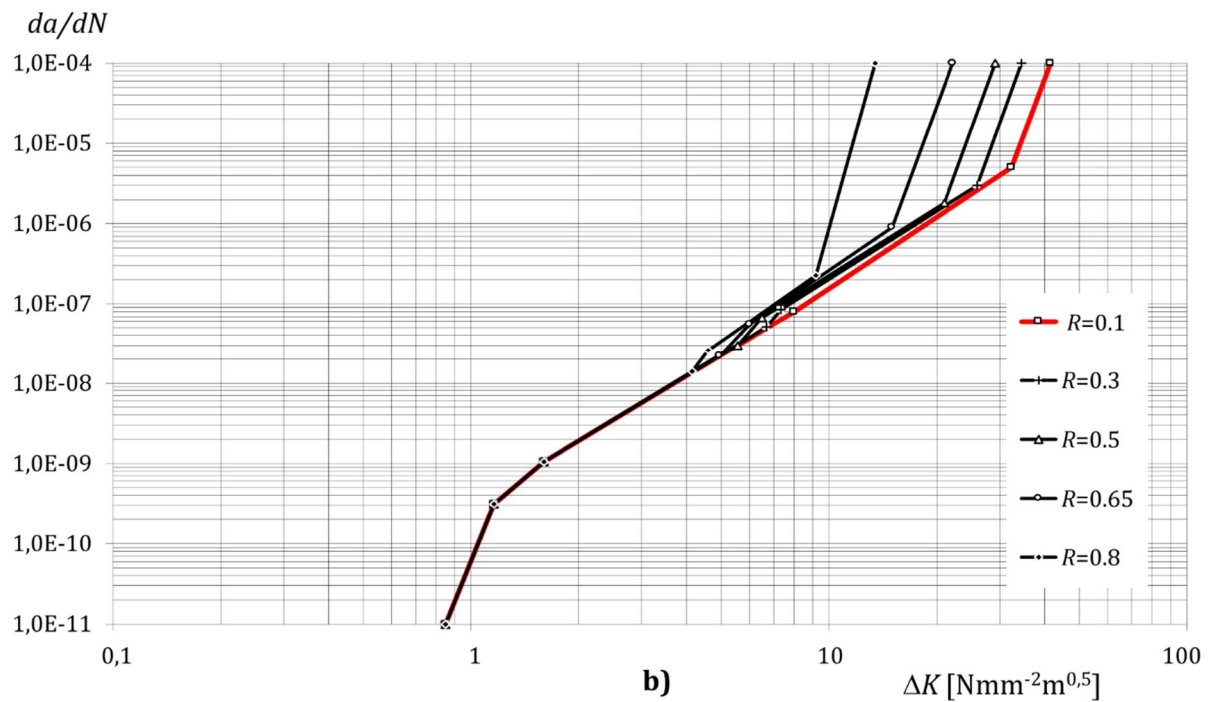
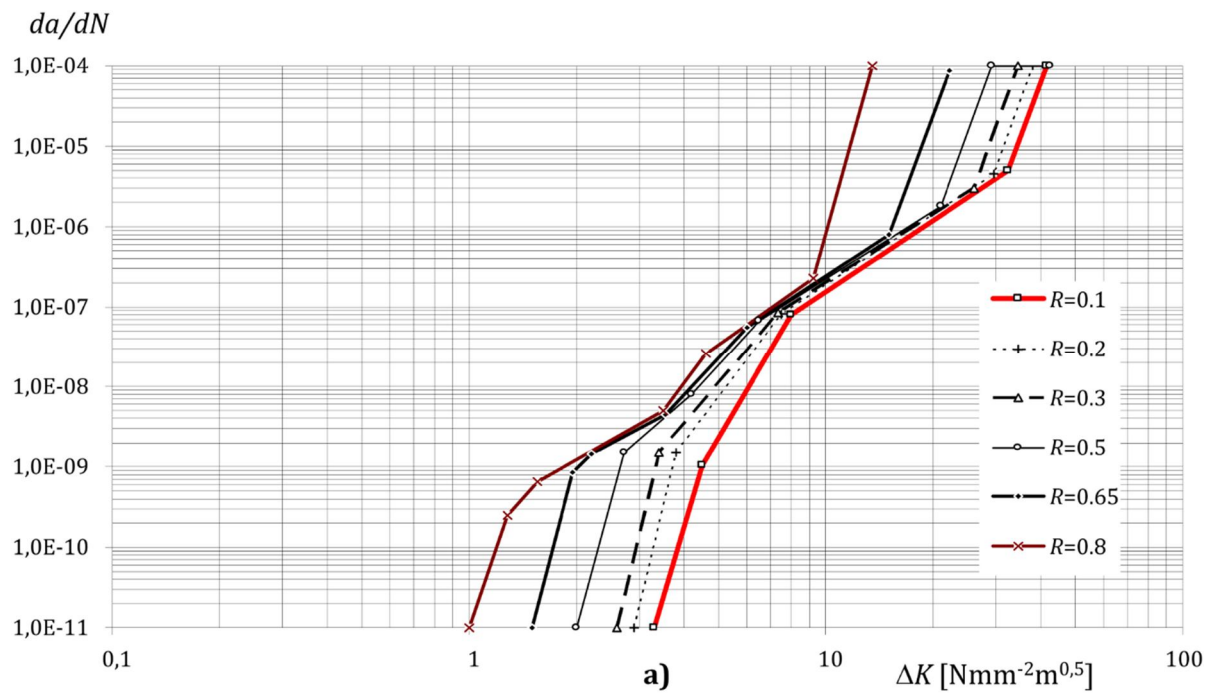
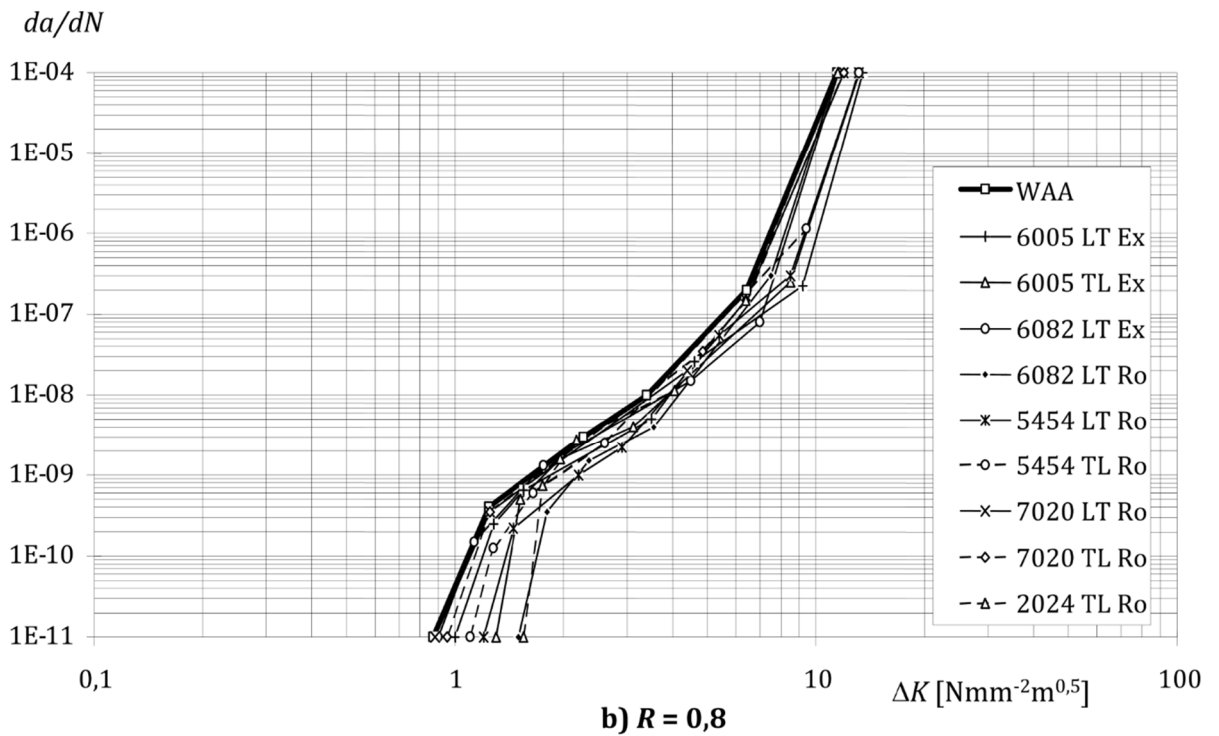
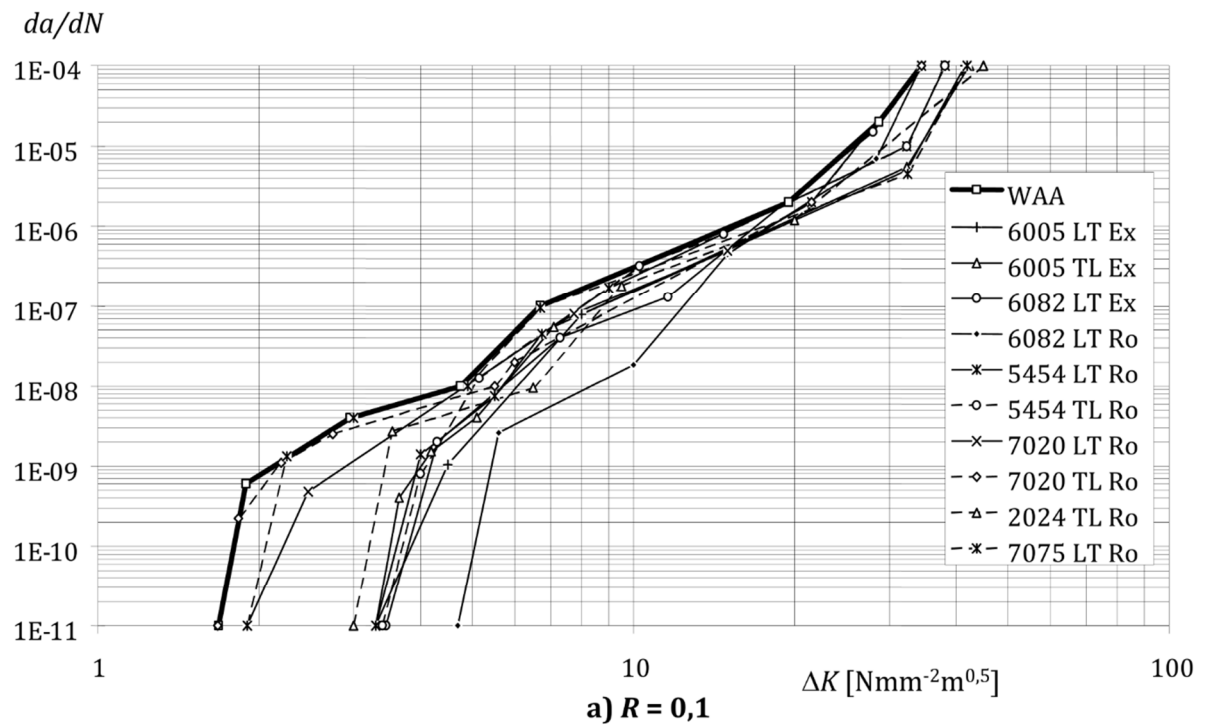


Рисунок В.3 — Типові криві росту втомних тріщин для алюмінієвого сплаву
EN AW-6005A T6 L

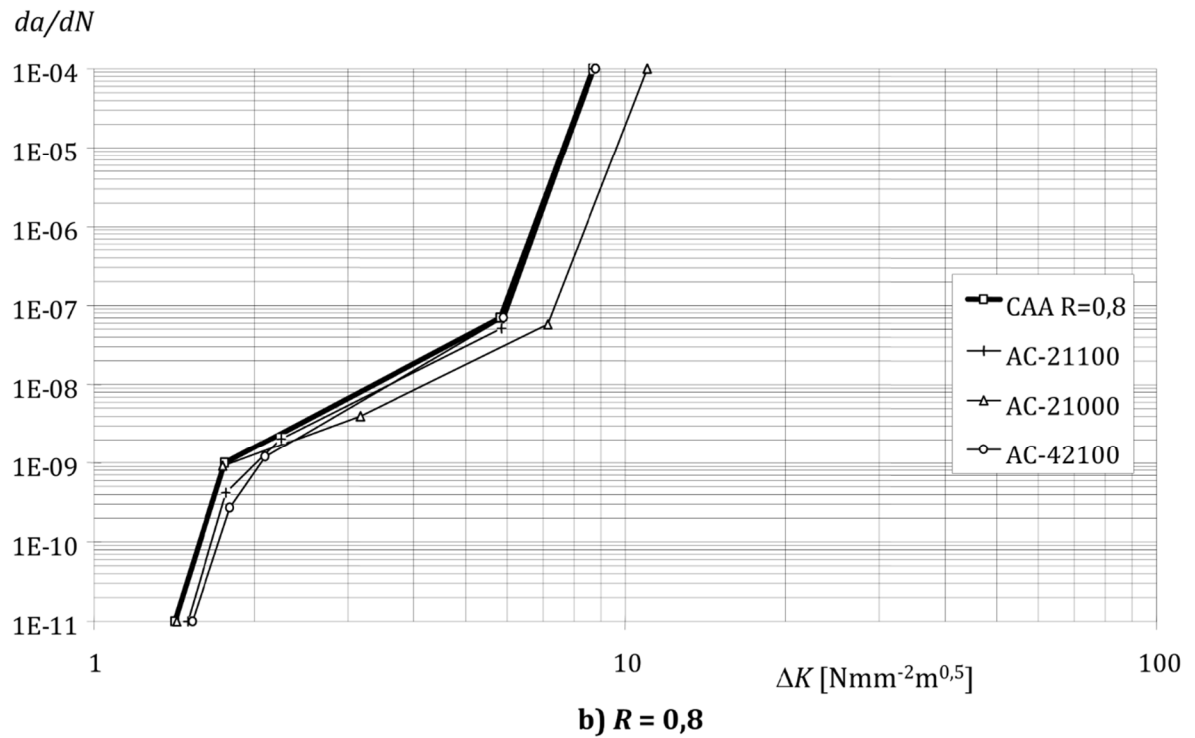
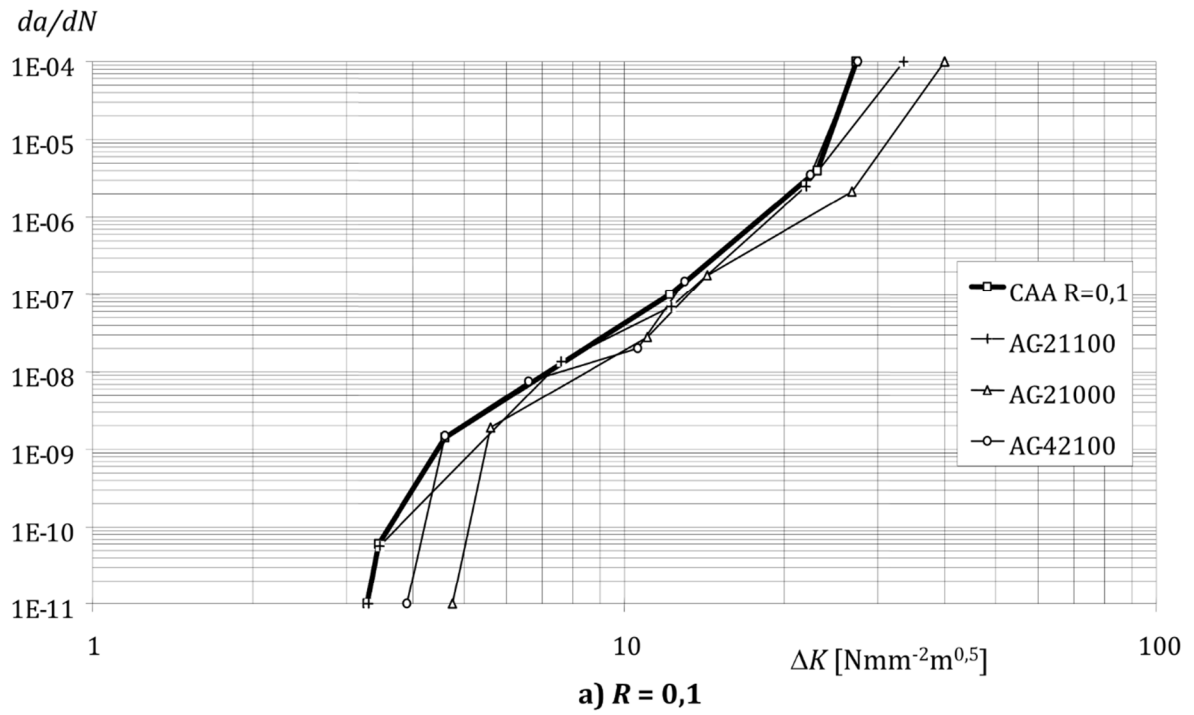
Таблиця В.1 — Дані швидкості росту втомної тріщини, ΔK [Нмм⁻²м^{0,5}]

EN AW-6005A T6 LT, $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{const}$								EN AW-6005A T6 LT, $K_{\max} = 10\text{H MM}^{-2} \text{M}^{0,5} = \text{const}$									
R	ΔK	m	A	R	ΔK	m	A	R	ΔK	m	A	R	ΔK	m	A		
0,10	3,30	15,0	$1,658 \times 10^{-19}$	0,50	2,00	16,3	$1,243 \times 10^{-16}$	0,10	0,85	11,1	$6,068 \times 10^{-11}$	0,50	0,85	11,0	$6,069 \times 10^{-11}$		
	4,50	7,52	$1,293 \times 10^{-14}$		2,72	3,85	$3,174 \times 10^{-11}$		1,16	3,74	$1,807 \times 10^{-10}$		1,16	3,74	$1,807 \times 10^{-10}$		
	8,00	2,96	$1,674 \times 10^{-10}$		4,20	4,87	$7,415 \times 10^{-12}$		1,60	2,69	$2,970 \times 10^{-10}$		1,60	2,70	$2,958 \times 10^{-10}$		
	32,4	12,0	$4,100 \times 10^{-24}$		6,50	2,81	$3,507 \times 10^{-10}$		8,00	2,96	$1,674 \times 10^{-10}$		5,55	5,09	$4,923 \times 0^{-12}$		
	41,6	12,0	$4,100 \times 10^{-24}$		21,0	12,2	$1,211 \times 10^{-22}$		32,4	12,0	$4,103 \times 10^{-24}$		6,50	2,81	$3,507 \times 10^{-10}$		
0,20	60,0	12,0	$4,100 \times 10^{-24}$	0,65	29,2	12,2	$1,211 \times 10^{-22}$	0,30	41,6	12,0	$4,103 \times 10^{-24}$	0,65	21,0	12,2	$1,210 \times 10^{-22}$		
	2,90	18,5	$2,680 \times 10^{-20}$		42,5	12,2	$1,211 \times 10^{-22}$		0,85	11,1	$6,069 \times 10^{-11}$		29,2	12,2	$1,210 \times 10^{-22}$		
	3,80	5,87	$5,950 \times 10^{-13}$		1,50	16,9	$1,042 \times 10^{-14}$		1,16	3,74	$1,807 \times 10^{-10}$		0,85	11,1	$6,069 \times 10^{-11}$		
	7,50	2,93	$2,229 \times 10^{-10}$		1,95	4,43	$4,419 \times 10^{-11}$		1,60	2,71	$2,936 \times 10^{-10}$		1,16	3,74	$1,807 \times 10^{-10}$		
	29,6	12,4	$2,253 \times 10^{-24}$		2,20	2,39	$2,207 \times 10^{-10}$		6,70	5,52	$1,413 \times 10^{-12}$		1,60	2,69	$2,960 \times 10^{-10}$		
0,30	38,0	12,4	$2,253 \times 10^{-24}$	0,80	3,55	4,77	$1,067 \times 10^{-11}$	0,80	7,35	2,82	$3,061 \times 10^{-10}$	0,80	4,95	4,76	$1,081 \times 10^{-11}$		
	55,0	12,4	$2,253 \times 10^{-24}$		6,00	3,05	$2,326 \times 10^{-10}$		26,0	12,4	$8,421 \times 10^{-24}$		6,00	3,05	$2,326 \times 10^{-10}$		
	2,60	18,6	$1,775 \times 10^{-19}$		15,0	12,0	$6,085 \times 10^{-21}$		34,5	12,4	$8,421 \times 10^{-24}$		15,0	12,0	$6,081 \times 10^{-21}$		
	3,40	5,24	$2,471 \times 10^{-12}$		22,2	12,0	$6,085 \times 10^{-21}$						22,2	12,0	$6,081 \times 10^{-21}$		
	7,35	2,82	$3,061 \times 10^{-10}$		1,00	13,0	$1,000 \times 10^{-11}$						0,85	11,1	$6,069 \times 10^{-11}$		
	26,0	12,4	$8,412 \times 10^{-24}$	0,80	1,28	4,99	$7,290 \times 10^{-11}$	0,80				0,80	1,16	3,74	$1,807 \times 10^{-10}$		
	34,5	12,4	$8,412 \times 10^{-24}$		1,55	2,50	$2,169 \times 10^{-11}$						1,60	2,72	$2,928 \times 10^{-10}$		
	50,0	12,4	$8,412 \times 10^{-24}$		3,50	6,03	$2,611 \times 10^{-12}$						4,15	6,01	$2,690 \times 10^{-10}$		
					4,60	3,12	$2,225 \times 10^{-10}$						4,60	3,12	$2,225 \times 10^{-10}$		
					9,20	15,9	$9,830 \times 10^{-23}$						9,20	15,9	$9,819 \times 10^{-23}$		
					13,5	15,9	$9,830 \times 10^{-23}$								13,5	15,9	$9,819 \times 10^{-23}$



Примітка. Сплави 2024 TL Ro і 7075 LT Ro не призначені для використання в будівництві. Їх наведено тут для порівняння.

Рисунок В.4 — Типові криві швидкості росту втомних тріщин для різних деформівних сплавів



Примітка. Сплави EN AC-21100 і EN AC-211000 не призначені для використання в будівництві. Їх наведено тут для порівняння.

Рисунок В.5 — Типові криві росту втомних тріщин для різних ливарних сплавів

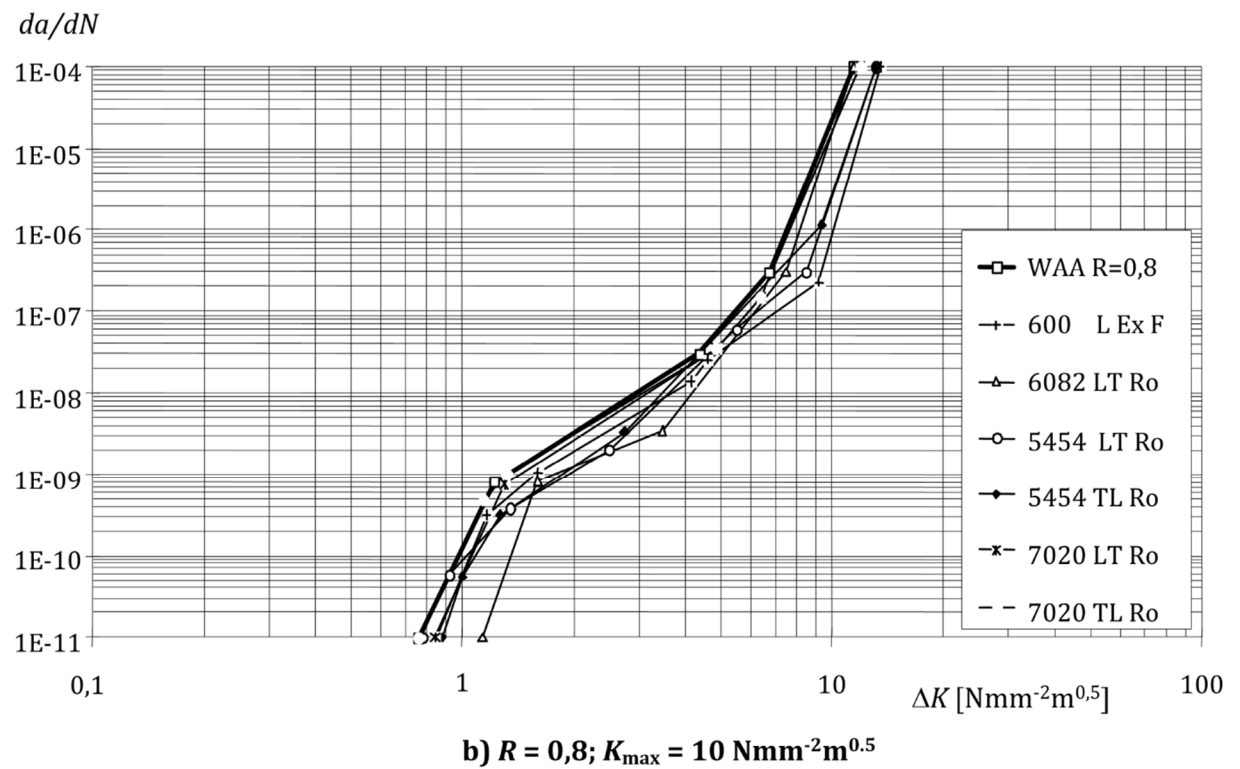
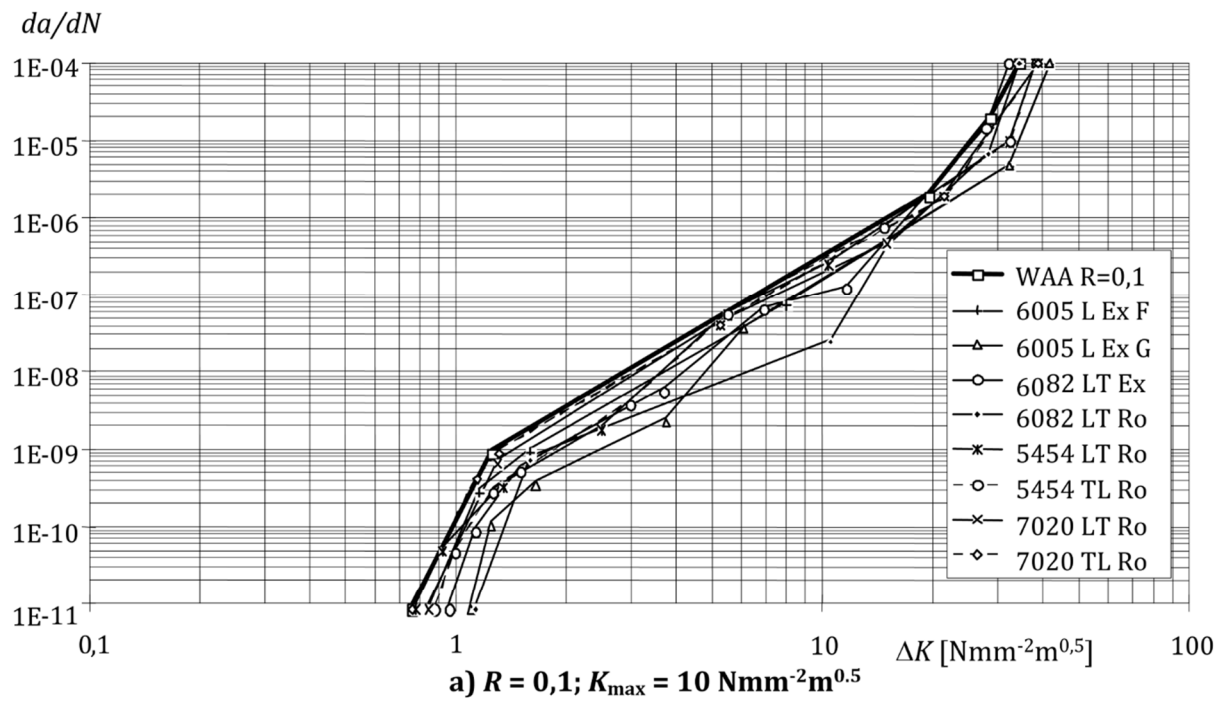
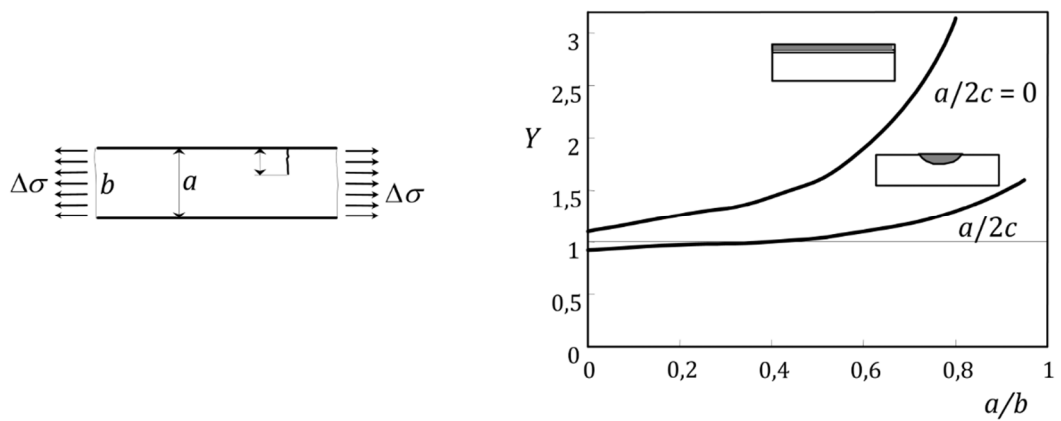


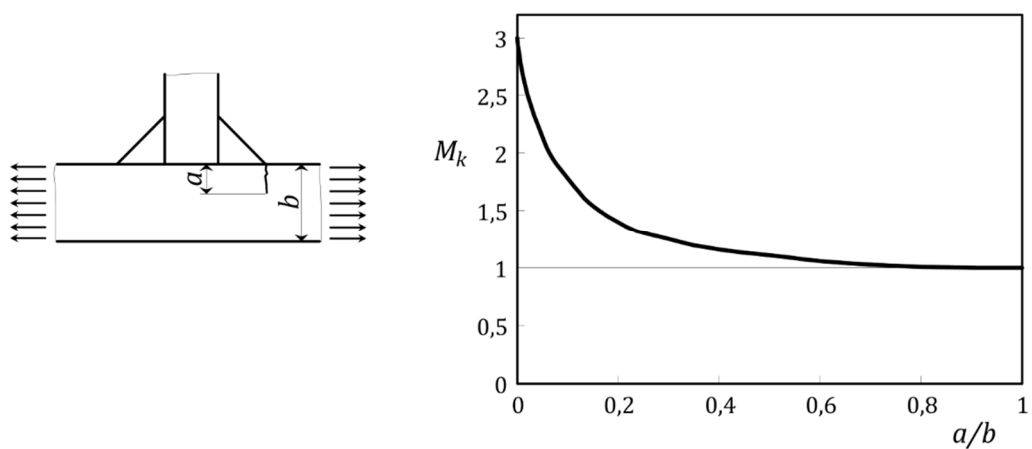
Рисунок В.6 — Типові криві росту втомних тріщин для різних деформівних сплавів

Таблиця В.2 — Дані швидкості росту втомної тріщини, ΔK [$\text{Нмм}^{-2}\text{м}^{0,5}$]

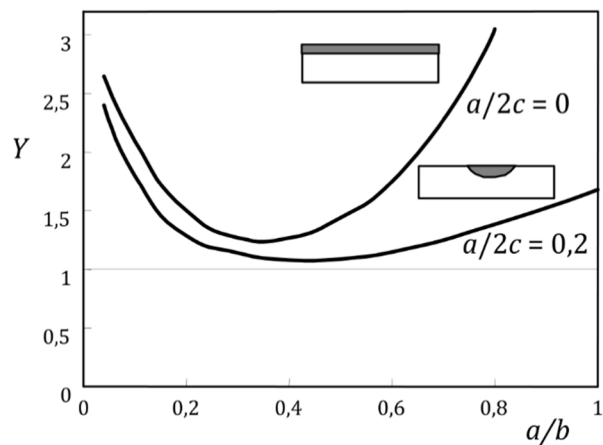
Деформівні сплави $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{const}$					Ливарні сплави $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{const}$					Деформівні сплави $K_{\max} = 10\text{Нмм}^{-2}\text{м}^{0,5} = \text{const}$				
R	ΔK	m	A		R	ΔK	m	A		R	ΔK	m	A	
a) 0,10	1,68 1,89 2,96 4,75 6,70 19,5 28,7 34,5	34,8 4,23 1,94 6,69 2,80 5,96 8,74 8,74	$1,472 \times 10^{-19}$ $4,065 \times 10^{-11}$ $4,886 \times 10^{-10}$ $2,951 \times 10^{-13}$ $4,825 \times 10^{-10}$ $4,123 \times 10^{-14}$ $3,575 \times 10^{-18}$ $3,575 \times 10^{-18}$		a) 0,10	3,28 3,45 4,60 12,2 23,1 27,3	35,5 11,0 4,37 5,78 19,1 19,1	$5,102 \times 10^{-30}$ $7,184 \times 10^{-17}$ $1,822 \times 10^{-12}$ $5,372 \times 10^{-14}$ $3,475 \times 10^{-32}$ $3,475 \times 10^{-32}$		a) 0,10	0,76 1,26 19,5 28,7 34,5	9,13 2,77 5,95 8,79 8,79	$1,211 \times 10^{-10}$ $5,266 \times 10^{-10}$ $4,190 \times 10^{-14}$ $3,072 \times 10^{-18}$ $3,072 \times 10^{-18}$	
b) 0,80	0,87 1,24 2,27 3,40 6,44 11,5	10,4 3,33 2,98 4,69 10,8 10,8	$4,276 \times 10^{-11}$ $1,959 \times 10^{-10}$ $2,603 \times 10^{-10}$ $3,246 \times 10^{-11}$ $3,730 \times 10^{-16}$ $3,730 \times 10^{-16}$		b) 0,80	1,42 1,76 5,82 8,70	21,2 3,55 18,1 18,1	$6,085 \times 10^{-15}$ $1,342 \times 10^{-10}$ $1,055 \times 10^{-21}$ $1,055 \times 10^{-21}$		b) 0,80	0,76 1,22 4,37 6,76 11,5	9,27 2,84 5,28 11,0 11,0	$1,275 \times 10^{-10}$ $4,560 \times 10^{-10}$ $1,243 \times 10^{-11}$ $2,128 \times 10^{-16}$ $2,128 \times 10^{-16}$	
Примітка. Ці значення є верхніми межами обвідних, отриманими з кривих на рисунку В.4(a) та (b).					Примітка. Ці значення є верхніми межами обвідних, отриманими з кривих на рисунку В.5.									



а) Значення Y для плоскої пластини; a/b = відношення глибини тріщин



б) Значення M_k для концентрації напружень на горизонтальному краю шва



с) Значення для зварного з'єднання

Рисунок В.7 — Використання типових стандартних геометричних рішень для Y і M_k

ДОДАТОК С

(довідковий)

МЕТОД ТЕСТОВИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ВТОМУ

С.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає окремі настанови до 4.2.3, 4.3.2, 5, 7.1.1, 7.2.2, 7.2.4, 8.2.2, А.4.3, А.5.3, Е.2, Н.2, І.2 щодо випробувань на втомну міцність.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, його можна використовувати.

С.2 Сфера та галузь застосування

(1) Якщо для повної перевірки конструкції за допомогою розрахунків відповідно до 4.3.1 або 4.3.2 недостатньо даних, додаткові відомості рекомендовано отримати за допомогою спеціальної програми випробувань. У цьому випадку дані випробувань можуть знадобитися з однієї або декількох наступних причин:

а) історія або спектр прикладених навантажень, як для одного, так і для декількох навантажень, недоступні і виходять за межі практичних методів розрахунку конструкції (див. 4.3.1 і 4.3.2). Це особливо стосується рухомих, гідравлічно або аеродинамічно навантажених конструкцій, де можуть виникати динамічні або резонансні ефекти;

б) геометрія конструкції настільки складна, що оцінка зусиль в елементах або локальних полів напружень не може бути отримана практичними методами розрахунків (див. 7.2 і 7.4);

с) матеріали, розміри деталей або методи виготовлення елементів чи з'єднань відрізняються від наведених у таблицях категорій деталей;

д) для перевірки стійкості конструкції до пошкоджень необхідні

дані про ріст тріщин.

(2) Випробування дозволено проводити на повних прототипах, на конструкціях, подібних до тих, що зводяться, або їх складових частинах. Інформація, отримана за результатами випробувань випробної конструкції або її складових частин, має відображати ступінь навантаження, матеріали, типи складових частин та методів виготовлення конструкції, яка має бути зведена.

(3) Дані випробувань рекомендовано використовувати замість стандартних даних тільки в тому випадку, якщо вони отримані та застосовані з використанням контрольованих методів.

С.3 Визначення параметрів діючого навантаження

С.3.1 *Нерухомі конструкції під дією механічного впливу*

(1) Такі конструкції, як мости, підкранові балки та опори машин, рекомендовано класифікувати як нерухомі конструкції під дією механічних впливів. Для отримання амплітуди, фази і частоти прикладених навантажень можна використовувати подібні конструкції в подібних умовах завантаження.

(2) Датчики деформації, прогину або прискорення, закріплені на вибраних елементах конструкції, які були відкалібровані під відомими навантаженнями, можуть реєструвати розподіл зусиль протягом типового періоду роботи конструкції, використовуючи аналогове або цифрове обладнання для збору даних. Елементи мають бути обрані таким чином, щоб основні складові навантаження могли бути незалежно визначені за допомогою коефіцієнтів впливу, отриманих з калібрувальних навантажень.

(3) Як альтернативу, тензодатчики дозволено встановлювати на контактну поверхню між прикладеним навантаженням і конструкцією, а безперервний запис може бути отриманий за допомогою подібного обладнання.

(4) Маса, жорсткість і логарифмічний декремент випробуваної конструкції мають бути в межах 30% відповідних характеристик конструкції в фінальній версії проєкту, а власна частота режимів, що викликають найбільші коливання деформацій, має бути в межах 10%. Якщо це не так, то реакція на навантаження має бути згодом перевірена на конструкції, що виготовлена за остаточним проєктом.

(5) Щоб отримати остаточний розрахунковий спектр рекомендовано помножити частотну складову спектру навантаження, отриману за робочий період, на відношення розрахункового строку експлуатації до робочого періоду. За необхідності рекомендовано також зробити поправку на зростання інтенсивності або частоти, або статистичну екстраполяцію від виміряного періоду до розрахункового строку експлуатації.

С.3.2 Нерухомі конструкції під впливом навколишнього середовища

(1) Такі конструкції, як щогли, димові труби і надводні конструкції морських платформ, рекомендовано класифікувати як нерухомі конструкції, що зазнають впливів навколишнього середовища. Рекомендовано застосовувати методи визначення спектру навантаження, наведені в С.3.1, за винятком того, що робочий період, як правило, має бути довшим через необхідність отримання репрезентативного спектру навантажень, зумовлених умовами впливу, таких як вітрові та хвильові впливи. Втомні пошкодження, як правило, обмежено певним діапазоном в загальному спектрі завантаження через вплив резонансу, викликаного потоком рідини. Це, як правило, досить характерно для напрямку, частоти і демпфірування. З цієї причини необхідна більша точність при моделюванні як конструктивних властивостей (маса, жорсткість і демпфірування), так і аеродинамічних властивостей (геометрія поперечного перерізу).

(2) Навантаження рекомендовано перевіряти, якщо вихідні дані про нього отримано для конструкцій з власною частотою або демпфірування, що відрізняються більш ніж на 10 %, або якщо форма поперечного перерізу не є ідентичною.

(3) Остаточний розрахунковий спектр можна отримати у вигляді напрямку, інтенсивності та частоти навантаження, відповідним чином змінених шляхом порівняння даних про навантаження протягом періоду збору даних з метеорологічними даними, отриманими протягом типового розрахункового строку експлуатації конструкції.

С.3.3 Рухомі конструкції

(1) Такі конструкції, як мостові крани та інші конструкції на колесах, транспортні засоби та плавучі споруди рекомендовано класифікувати як рухомі конструкції. Для цих типів конструкцій геометрія поверхні руху має бути адекватно визначена з точки зору форми та амплітуди коливань і частоти, оскільки це матиме значний вплив на динамічне завантаження конструкції.

(2) Інші впливи, такі як завантаження і розвантаження вантажу, можна виміряти за допомогою методів, викладених у С.3.1.

(3) Щоб отримати історії навантажень для прототипів конструкцій можна використовувати їздові поверхні, такі як спеціально побудовані випробувальні доріжки. Дані про навантаження попередніх конструкцій рекомендовано використовувати з обережністю, оскільки невеликі відмінності, особливо в конструкції візків, наприклад, можуть суттєво змінити динамічну реакцію. Рекомендовано перевіряти завантаження на остаточній конструкції, якщо повномасштабні випробування на втому не застосовано (див. С.4).

С.4 Отримання даних по напруженням

С.4.1 Дані випробувань елементів конструкцій

(1) Якщо є прості елементи, в яких основні складові сили можуть бути легко розраховані або виміряні, рекомендовано випробовувати елементи, що містять з'єднання або деталі конструкції, які підлягають аналізу.

(2) Відповідний зразок ідентичних розмірів з тими, що використано в остаточному проєкті, має бути випробуваний відповідно до спрощеної оцінки геометричних напружень (див. Додаток D) за допомогою зручного методу, наприклад, електричних дротяних тензорезисторів, муарових візерунків або методів термопружності. Торці елемента мають бути достатньо віддалені від зони дослідження, щоб локальні ефекти в точці прикладання навантаження не впливали на розподіл напружень в цій точці. Компоненти сил і градієнти напружень в зоні дослідження, мають бути ідентичними компонентам у всій конструкції.

(3) Коефіцієнти впливу можна отримати зі статично прикладених навантажень, що дозволить визначити структуру напружень для будь-якої бажаної комбінації компонентів навантаження. За необхідності коефіцієнти можна отримати зі зменшених зразків, за умови, що всі компоненти будуть масштабовані однаково.

С.4.2 Дані випробувань конструкцій

(1) У певних типах конструкцій, таких як оболонки, де суцільність конструкційного матеріалу може унеможливити ізоляцію компонентів простим прикладанням зусиль, дані про напруження мають бути отримані з прототипів або серійних конструкцій.

(2) Для проведення вимірювань можна використовувати такі ж методи, як і для випробувань елементів. У більшості випадків статичні

навантаження рекомендовано прикладати як незалежні компоненти, щоб напруження можна було об'єднати, використовуючи індивідуальні коефіцієнти впливу для точки, що становить інтерес. Перед отриманням даних про коефіцієнт впливу навантаження має пройти цикл пристосовності.

С.4.3 Верифікація історії напружень

(1) Той самий метод, що описаний в п. С.4.2, можна застосувати для перевірки історії напружень у певній точці під час випробування зразка при заданому завантаженні. У цьому випадку обладнання для збирання даних, як зазначено в п. С.3.1, рекомендовано використовувати для запису або повної історії напружень, або для підрахунку циклів. Останнє можна використати для прогнозування ресурсу після вибору відповідної кривої втомної міцності.

(2) У випадку невизначеної історії завантажень в якості альтернативи на конструкції, що експлуатується, дозволено застосовувати постійне закріплення пристрою для підрахунку циклів.

С.5 Отримання даних щодо витривалості

С.5.1 Випробування окремих компонентів

(1) Якщо відомі спектри зусиль або дані про історію напружень, то для перевірки проектування критичних частин конструкції дозволено провести випробування елементів. Випробний елемент має бути виготовлений за тими самими розмірами і технологіями, які передбачається використати в остаточному проєкті. Всі ці аспекти мають бути повністю задокументовані перед виготовленням випробного елемента. Крім того, будь-який метод неруйнівного контролю та критерії приймання мають бути задокументовані разом зі звітом інспектора про якість з'єднань, що підлягають випробуванню.

(2) Дослідні зразки або складові частини конструкції мають бути

завантажені так, як описано в п. С.3.1. Для перевірки відповідності коливань напружень вимогам, рекомендовано використовувати тензорезистори, особливо для складових частин. Розташування тензорезисторів має бути таким, щоб вони реєстрували потрібний параметр напруження. Для реєстрування номінального напруження, датчик рекомендовано розташовувати на відстані не менше 10 мм від будь-якого краю зварного шва. Якщо градієнт напружень крутий, рекомендовано використовувати три датчики, щоб можна було виконати інтерполяцію.

(3) Розрахункові дані щодо витривалості, отримані на основі випробувань, мають відповідати тим самим процедурам статистичного оцінювання, які були використані для визначення розрахункових значень втомної міцності у 8.2. Зазвичай це включає в себе статистичну оцінку середнього значення і середньоквадратичного відхилення за умови нормального розподілу, виявлених логарифмічних життєвих циклів (залежна змінна) для заданих логарифмічних значень напружень (незалежна змінна) або, відповідно, лінійний регресійний аналіз $\log \Delta \sigma - \log N$ для різних діапазонів довговічності, див. рисунок 8.1. Таким чином, буде встановлена середня лінія регресії або характеристична лінія регресії для певної ймовірності безвідмовної роботи (зазвичай близько 97,7% або на рівні двох середньоквадратичних відхилів від середнього значення). Для потреб проєктування остання вважається подібною першій. Характеристична лінія регресії, визначена вище, не має перевищувати 80% відповідного середнього значення міцності. Це допускає більш широкі варіації у виробництві, ніж зазвичай очікувано у випадку використання одного набору втомних зразків.

(4) Цю спрощену процедуру визначення параметрів регресії часто застосовують, хоча її не рекомендовано вважати надійною у випадку невеликих вибірок. Для відповідних поправочних коефіцієнтів

наведено настанови у С.5.3.

(5) Для методу допустимої пошкоджуваності, рекомендовано отримати дані про ріст втомних тріщин за певну кількість циклів.

(6) В якості альтернативи, якщо відома історія розрахункових напружень і доступне обладнання для генерації змінної амплітуди, зразок дозволено випробовувати з неврахованою історією напружень.

С.5.2 Натурні випробування

(1) Повномасштабні випробування дозволено проводити в реальних умовах експлуатації або у випробувальній установці з випробувальним навантаженням на елементи за допомогою гідравлічного або іншого методу управління.

(2) Застосовані прикладені навантаження не мають перевищувати номінальних навантажень.

(3) Якщо експлуатаційні навантаження випадковим чином варіюються між граничними значеннями, вони мають бути представлені еквівалентною серією навантажень, узгодженою між виробником і замовником.

(4) Як альтернатива, випробувальні навантаження мають відповідати характеристичній комбінації впливів.

(5) Прикладання навантажень до зразка має точно відтворювати експлуатаційні умови, очікувані для конструкції або елемента під час експлуатації.

(6) Випробування мають тривати до руйнування або до того часу, поки зразок не стане нездатним витримувати повне випробувальне навантаження через отримані пошкодження.

(7) Кількість прикладання випробувального(их) навантаження(ь) до руйнування має бути точно підрахована і зареєстрована із спостереженнями за прогресивним розвитком тріщин.

C.5.3 Критерій прийнятності

(1) Критерій прийнятності залежить від того, чи потрібне від конструкції забезпечення безпечного ресурсу, див. параграфи (2) — (7), або стійкості до пошкоджень, див. параграф (11).

(2) Для прийняття конструкції за критерієм безпечного ресурсу, термін служби до відмови, визначений випробуваннями і скоригований з урахуванням кількості наявних результатів випробувань, не має бути меншим за розрахунковий строк експлуатації (визначений в А.4.2) за формулою (C.1):

$$T_L = T_m / F \quad (C.1)$$

де T_L — розрахунковий строк експлуатації (у циклах);

T_m — середнє напрацювання до відмови, визначене за результатами випробувань (у циклах);

F — коефіцієнт випробування на втому, що залежить від ефективної кількості наявних результатів випробувань, як визначено в Таблиці В.1.

(3) При оцінюванні значень коефіцієнта F застосовують наступні загальні статистичні принципи та припущення. Характеристичне статистичне значення отримують за формулою (C.2):

$$\chi_c = \mu - K\sigma \quad (C.2)$$

де K залежить від розподілу ймовірностей і необхідної ймовірності безвідмовної роботи для статистичного розподілу із середнім значенням μ і середньоквадратичним відхилом σ .

На практиці для обсягу вибірки n дозволено розрахувати лише значення середнього та середньоквадратичного відхилу, тобто χ_m та s відповідно. Таким чином, мають бути застосовані поправочні коефіцієнти, що виражають довірчі інтервали як для середнього, так і для дисперсії (або середньоквадратичного відхилу). Таким чином, формулу (C.2) можна представити у вигляді формули (C.3):

$$\chi_c = \chi_m - k \quad (\text{C.3})$$

де $k = k_1 k_2 + k_3$;

k_1 — теоретичне значення розподілу, що належить конкретній ймовірності безвідмовної роботи;

k_2 — поправка на довірчий інтервал середньоквадратичного відхилення;

k_3 — поправка на довірчий інтервал середнього значення.

Примітка. k_2 і k_3 залежать від середньоквадратичного відхилення s , обсягу вибірки n і встановленого рівня довірчої ймовірності.

У загальному випадку застосовують формулу (C.4):

$$k = k_1 k_2 + k_3 = Z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{n}{\chi^2_{(\alpha/2, n-1)}} + \frac{t_{(1-\alpha/2, n-1)}}{\sqrt{n}}} \quad (\text{C.4})$$

де n — розмір вибірки;

α — довірна ймовірність або значення ймовірності (у випадку нормального розподілу);

$Z_{(1-\alpha/2)}$ — значення нормального розподілу ймовірностей із заданою ймовірністю безвідмовної роботи $(1 - \alpha/2)$, що відповідає двосторонній ймовірності $(1 - \alpha)$;

$\chi^2_{(\alpha/2, n-1)}$ — значення розподілу ймовірностей хі-квадрат для заданого довірчого інтервалу $\alpha/2$ та $n - 1$ ступенів вільності;

$t_{(1-\alpha/2, n-1)}$ — значення t -розподілу ймовірностей для заданої ймовірності $(1 - \alpha/2)$, що відповідає двосторонній ймовірності $(1 - \alpha)$ та $n - 1$ ступеням вільності.

Для використання цих правил зроблено наступні припущення:

— значення середньоквадратичного відхилення відоме з попереднього досвіду, тобто, виходячи з достатньо великого розміру

вибірки, це дозволяє встановити k_2 рівним одиниці;

— наявні достатні відомості про основний розподіл або немає суттєвих відхилів від нормального розподілу;

— під час коригування довірчого інтервалу для середнього значення t -розподіл можна замінити нормальним розподілом.

(4) У загальному випадку, коли більшу кількість зразків випробувано до руйнування, рекомендовано використовувати формулу (С.5):

$$k = k_1 + k_3 = Z_{(1-\alpha/2)} + \frac{Z_{(1-\alpha/2)}}{\sqrt{n}} \quad (\text{С.5})$$

Примітка. Це різновид формули (С.3).

(5) У випадку більшої кількості зразків, які одночасно випробовують до руйнування першого зразка і для того, щоб оцінити k , прийнято припущення, що:

— отриманий ресурс першого зразка — відносно T_L з формули (С.1) — буде розташований на верхній межі відповідного розподілу;

— необхідний або розрахунковий строк експлуатації — відносно T_m з формули (С.1) — буде розташований на нижній межі розподілу.

Нижню межу буде отримано з $\chi_m - k_1 s$, де k_1 визначено за формулою (С.4). Верхню межу буде отримано відповідно з $\chi_m + k_4 s$. Значення k_4 розраховано з припущення того, що при ймовірності безвідмовної роботи одного зразка, який виходить з ладу на відповідному етапі життєвого циклу, P , ймовірність безвідмовної роботи n зразків на тому ж рівні буде P^n . У запас надійності буде визначено достатньо низьке значення $P^n = c$, і k_4 , яке буде розраховано з нормального розподілу з ймовірністю $c^{1/n}$ для відповідних значень n .

Коефіцієнт k потім обчислюють за формулою (С.6):

$$k = k_1 + k_2 = Z_{(1-\alpha/2)} + Z_p \quad (C.6)$$

(6) З формули (C.1) отримують формулу (C.7):

$$\log T_L = \log T_m - \log F \quad (C.7)$$

яка в порівнянні з формулою (C.2) дає формулу (C.8):

$$\log F = k s \quad (C.8)$$

або формулу (C.9):

$$F = 10^{ks} \quad (C.9)$$

та F визначають за таблицею C.1.

(7) Рекомендовано оцінити значення середньоквадратичного відхилу. Попередній досвід роботи з подібними конструкціями дає більш надійні значення. Наявні дані (Додатки C.1 і C.2) для різних зварних алюмінієвих конструкцій дають діапазон різних значень середньоквадратичного відхилу $s_{\log \Delta \sigma}$. Їх дозволено перетворювати за допомогою відповідного середнього нахилу лінії регресії $m = 4$ до значень $s_{\log N}$ для діапазону довговічності до межі втоми за постійної амплітуди 5×10^6 циклів. Для довговічності до 10^8 циклів можна використовувати більші значення розкиду відповідно до нахилу $m + 2$. Особливу увагу рекомендовано приділити випадкам, які виходять за вказану межу.

(8) Значення F , розраховані на основі наведених вище статистичних залежностей, наведено в Таблиці C.1.

Таблиця C.1 — Коефіцієнт випробування на втому F

Результат випробувань	Об'єм вибірки n											
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	100
Кількість ідентичних зразків, зруйнованих під час випробування	3,91	3,20	2,93	2,78	2,68	2,61	2,52	2,45	2,36	2,30	2,24	2,12
Кількість зразків випробуваних одночасно.	3,91	2,71	2,27	2,03	1,88	1,77	1,61	1,51	1,36	1,26	1,15	0,91

Перший зразок не пройшов випробування												
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

(9) Значення в таблиці С.1 базуються на ймовірності безвідмовної роботи 95 % і довірчій ймовірності 0,95 для нормального розподілу та значенні стандартного відхилу $s_{\log N} = 0,18$. У випадку невдачі першої спроби передбачається, що ймовірність безвідмовної роботи становить $P^n = 5\%$.

(10) Критерії для врахування визначеного строку експлуатації і для прийомки залежать від конкретного призначення і мають бути узгоджені зі стороною, яка відповідальна за прийомку.

(11) Прийняття конструкції за концепцією допустимої пошкоджуваності залежить від часу, протягом якого тріщина досягає розміру, який може бути виявлено за допомогою методу контролю, що може бути застосований під час експлуатації. Це також залежить від швидкості росту тріщини, міркувань щодо критичної довжини тріщини та наслідків для залишкової безпеки конструкції і витрат на ремонт.

С.6 Дані про зростання тріщин

(1) Вказівки щодо отримання даних про розвиток тріщин наведено в Додатку В.

С.7 Звітність

(1) Після завершення будь-якого випробування, проведеного відповідно до цього розділу, має бути складений сертифікат випробування, що містить наступну інформацію:

- а) назва та адреса дослідної лабораторії;
- б) посилання на акредитацію дослідної лабораторії (де це доречно);
- с) дата проведення випробування;

d) ім'я (імена) особи (осіб), відповідальної (-их) за проведення випробувань;

e) опис зразка, що випробовувався, за допомогою:

- 1) посилання на серійний номер, де це доречно; або
- 2) посилання на номер(и) креслення, де це доречно; або
- 3) опису з ескізами або схемами; або
- 4) фотографій;

f) опис застосованих схем навантаження, включно з посиланнями на інші Європейські стандарти, де це доречно;

g) облік застосованих навантажень і вимірних реакцій від дії навантажень, тобто прогину, деформації, строку експлуатації;

h) зведення дані про навантаження, деформації та напруження у критичних точках контролю;

i) відомості про ресурс та характер відмов;

j) відомості про місця проведення спостережень відповідно до параграфів e) 2) — e) 4) зазначених вище;

k) відомості про будь-яку виявлену поведінку, що має відношення до безпеки або працездатності об'єкта, що випробовується, наприклад, характер і розташування тріщин під час випробування на втому;

l) облік умов впливу навколишнього середовища під час випробування, де це доречно;

m) відомості про перевірку всього використаного вимірювального обладнання;

n) визначення мети або потреб випробування;

o) висновок про відповідність або невідповідність вимогам прийнятих критеріїв, залежно від обставин;

p) запис імен та статусу осіб, відповідальних за проведення випробувань та видачу звіту;

q) найменування звіту та дата видачі.

ДОДАТОК D

(довідковий)

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНЬ

D.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає настанови до 7.1.3, 7.2.3, 7.2.4, C.4.1 щодо аналізу навантажень.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, його можна використовувати.

D.2 Сфера та область застосування

(1) Цей довідковий додаток охоплює вибір методів аналізу, які забезпечують точне прогнозування напружень в пружній стадії роботи конструкції на задану втомну дію таким чином, щоб визначити максимальні та мінімальні значення напружень в історії напружень.

D.3 Застосування скінченних елементів для аналізу втоми

D.3.1 Типи елементів

D.3.1.1 Балкові елементи

(1) Балкові елементи в основному використовують для аналізу номінальних напружень в рамах і подібних конструкціях. Звичайний балковий елемент для аналізу тривимірних рам має шість ступенів вільності в кожному кінцевому вузлі: три переміщення і три кути повороту. Цей елемент може правильно описати поведінку при крученні лише у випадках, коли поперечний переріз не схильний до викривлення, або викривлення може відбуватися вільно.

(2) Аналіз напружень при викривленнях неможливий, коли аналізують елементи відкритого або порожнистого профілю, які

схильні до викривлення, якщо не застосовано відповідні балкові елементи, що мають сім ступенів вільності, включаючи викривлення.

(3) Зазвичай балкові елементи жорстко з'єднані між собою у вузлових точках. В якості альтернативи можуть бути передбачені штифтові з'єднання. Однак у багатьох конструкціях з'єднання є напівжорсткими. Крім того, в трубчастих з'єднаннях жорсткість розподілена нерівномірно, що викликає додаткові згинальні моменти. Такі конструктивні особливості вимагають більш складного моделювання, ніж використання жорстких або штифтових з'єднань.

D.3.1.2 Мембранні елементи

(1) Мембранні елементи призначені для моделювання пластинчастих конструкцій, які працюють у площині. Вони не можуть враховувати напруження від згинальних моментів. Трикутні та прямокутні пластинчасті елементи придатні для розрахунку номінальних мембранних полів напружень у великих підкріплених пластинчастих конструкціях.

D.3.1.3 Тонкостінні оболонкові елементи

(1) Програми скінченно-елементного розрахунку містять різні типи тонкостінних елементів. До них відносяться плоскі елементи, елементи одинарної кривини та елементи подвійної кривини. Поля деформацій зазвичай описують як лінійні (чотирьох-вузлові елементи) або параболічні (восьми-вузлові елементи). Загалом, тонкі оболонкові елементи придатні для розрахунку пружних структурних напружень відповідно до теорії оболонок. Напруження в середній площині дорівнює напруженню мембрани, а напруження на верхній і нижній поверхнях є накладеними напруженнями мембрани і згину оболонки.

(2) Тонкі оболонкові елементи можуть моделювати лише середні площини пластин. Фактичну товщину матеріалу задають як властивість тільки для елемента. Існують також тонкі оболонки з товщиною, що зменшується, які корисні, наприклад, для моделювання

литих конструкцій. Найсуттєвішим недоліком тонкостінних оболонкових елементів є те, що вони не можуть моделювати реальний розподіл жорсткості та напружень всередині і поблизу зони зварювання для перехресних оболонок.

D.3.1.4 Товстостінні оболонкові елементи

(1) Деякі скінченно-елементні комплекси також включають так звані товстостінні оболонкові елементи. Вони дозволяють враховувати деформації поперечного зсуву оболонки в напрямку товщини. Товстостінні оболонкові елементи працюють краще, ніж тонкостінні, наприклад, у конструкціях, де відстань між сусідніми перетинами оболонок невелика, що призводить до виникнення значних напружень зсуву.

D.3.1.5 Елементи для моделювання плоских деформацій

(1) Іноді корисно дослідити локальні поля напружень навколо надрізів за допомогою локальної двовимірної моделі. Поперечний переріз одиничної товщини можна моделювати як двовимірну структуру з використанням елементів для моделювання плоских деформацій.

D.3.2 Додаткові вказівки щодо використання скінченних елементів

(1) Твердотільні елементи необхідні для моделювання конструкцій з тривимірними полями напружень і деформацій. Вигнуті ізопараметричні 20-вузлові елементи, як правило, є найбільш придатними. У зварних компонентах вони іноді потрібні для моделювання зони перетину пластин або оболонок.

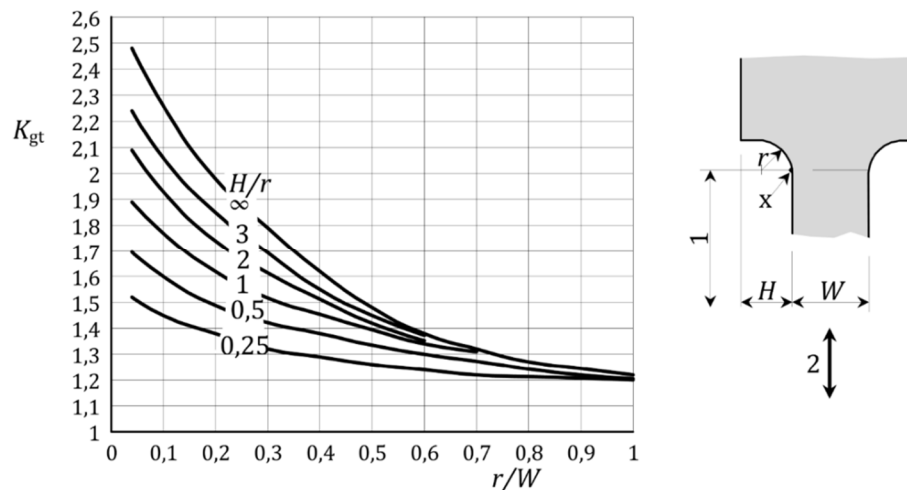
(2) Твердотільні елементи з лінійним формулюванням переміщень не рекомендовані через недостатню збіжність розрахунку при згущенні кінцево-елементної сітки.

(3) 10-вузлові твердотільні елементи у вигляді квадратичних тетраедрів дуже ефективні для автоматичної генерації сітки і забезпечують хорошу збіжність розрахунку.

D.4 Коефіцієнти концентрації напружень

(1) Значення коефіцієнтів концентрації напружень та коефіцієнтів надрізів для найпоширеніших геометричних форм можна отримати з літературних джерел.

(2) Типові значення K_{gt} для заокруглених кутів у плоскій пластині наведено на рисунках D.1 і D.2.



Умовні позначки:

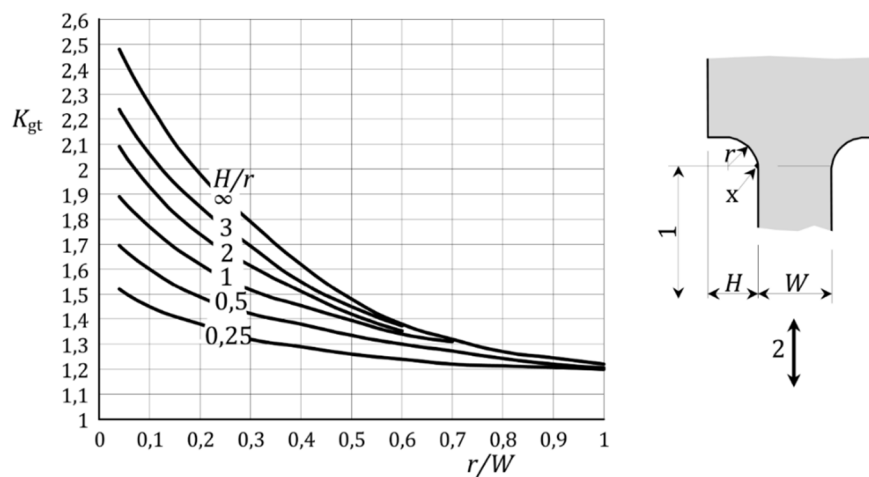
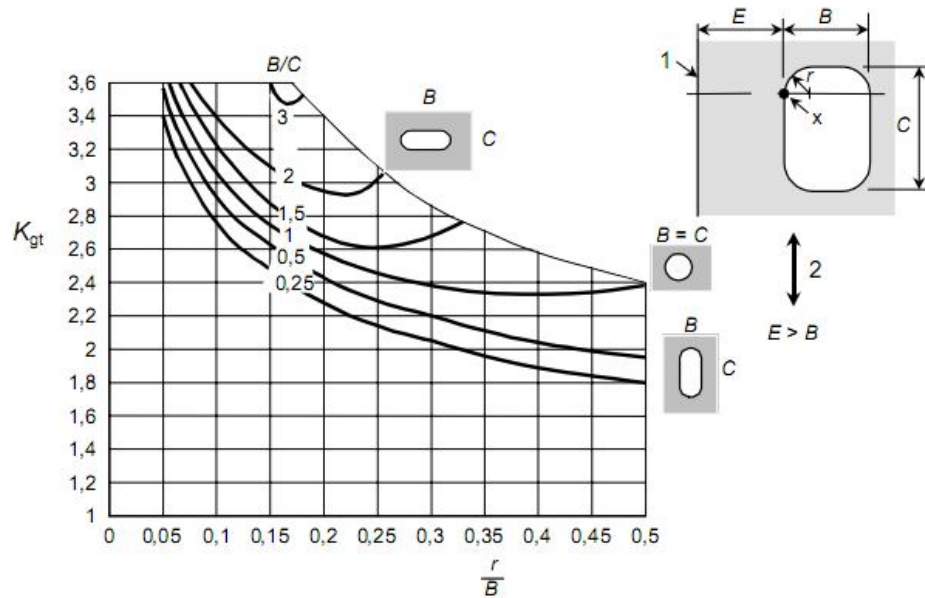
1 — вільний край;

2 — перепади напружень

Рисунок D.1 — Типові коефіцієнти концентрації напружень від заокруглених кутів у плоскій пластині — Коефіцієнт концентрації втомних напружень K_{gt} для непідсилених отворів на основі чистого напруження в точці X

Національна примітка

В тексті допущено технічну помилку. Має бути рисунок



Умовні позначки:

1 — довжина прямої $> 2r$;

2 — перепади напружень

Рисунок D.2 — Типові коефіцієнти концентрації напружень від заокруглених кутів у плоскій пластині — Коефіцієнт концентрації втомних напружень K_{gt} для внутрішніх кутів на основі чистого напруження в точці x

D.5 Обмеження втоми при повторній втраті місцевої стійкості

(1) Гнучкість пластинчастих елементів має бути обмежена, щоб

уникнути повторних локальних вигинів, які можуть призвести до втоми в місцях з'єднань країв або поруч з ними.

(2) Надмірним повторним локальним вигином дозволено нехтувати, якщо виконано критерій формули (D.1):

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{k_{\sigma}\sigma_E}\right)^2 + \left(\frac{1,1\tau_{x,Ed,ser}}{k_{\tau}\sigma_E}\right)^2} \leq 1,1 \quad (D.1)$$

де $\sigma_{x,Ed,ser}, \tau_{x,Ed,ser}$ — напруження для частої комбінації навантажень;

k_{σ}, k_{τ} — коефіцієнти лінійно-пружної втрати стійкості для випадку шарнірно закріплених країв пластинчастого елемента;

k_{σ} — відповідний коефіцієнт втрати стійкості, наведений у EN 1999-1-4:2023, таблиця 7.3;

k_{τ} — відповідний коефіцієнт втрати стійкості, наведений у EN 1999-1-1:2023, 8.6.5(3);

$$\sigma_E = 0,904 E (t_w / b_w)^2;$$

t_w, b_w — товщина і глибина стінки панелі.

Примітка. Термін «дихання стінки» може зустрічатися в літературі в тому ж значенні, що і повторна втрата місцевої стійкості.

ДОДАТОК Е

(довідковий)

КЛЕЙОВІ З'ЄДНАННЯ

Е.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток містить настанови до 5, 6, 7.5, 8.1, 8.2, L.6 щодо клейових з'єднань.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатка наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, його можна використовувати.

Е.2 Сфера та область застосування

(1) При проєктуванні клейових з'єднань рекомендовано враховувати наступне:

- дія відшарування має бути зведена до мінімуму;
- концентрація напружень має бути зведена до мінімуму;
- деформації в основному металі мають бути нижчими за межу текучості;
- хімічне оброблення або анодування поверхонь покращує адгезію порівняно зі знежиренням або механічним шліфуванням;
- агресивні впливи навколишнього середовища зазвичай зменшують втомну довговічність.

(2) Для з'єднань внапусток, що руйнуються в площині з'єднання, ефективний діапазон напружень зсуву, $\Delta\tau$, має базуватися на силі, яка діє на одиницю ширини з'єднання, поділеній на ефективну довжину з'єднання внапусток L_{adh} , де:

L_{adh} = довжина напустку L , де $L \leq 15$ мм

L_{adh} = 15 мм, де $L > 15$ мм

(3) Дані про втому для клейових з'єднань наведено в таблиці Е.1,

таблиці Е.2 та на рисунку Е.1.

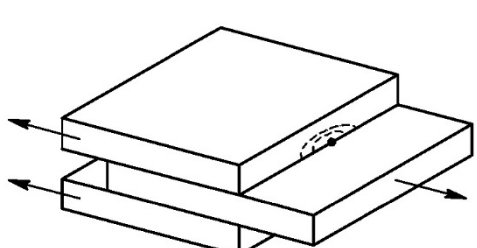
(4) Контрольну втомну міцність клейового з'єднання в два напусти, яке руйнується по лінії з'єднання, рекомендовано розраховувати за формулою (Е.1):

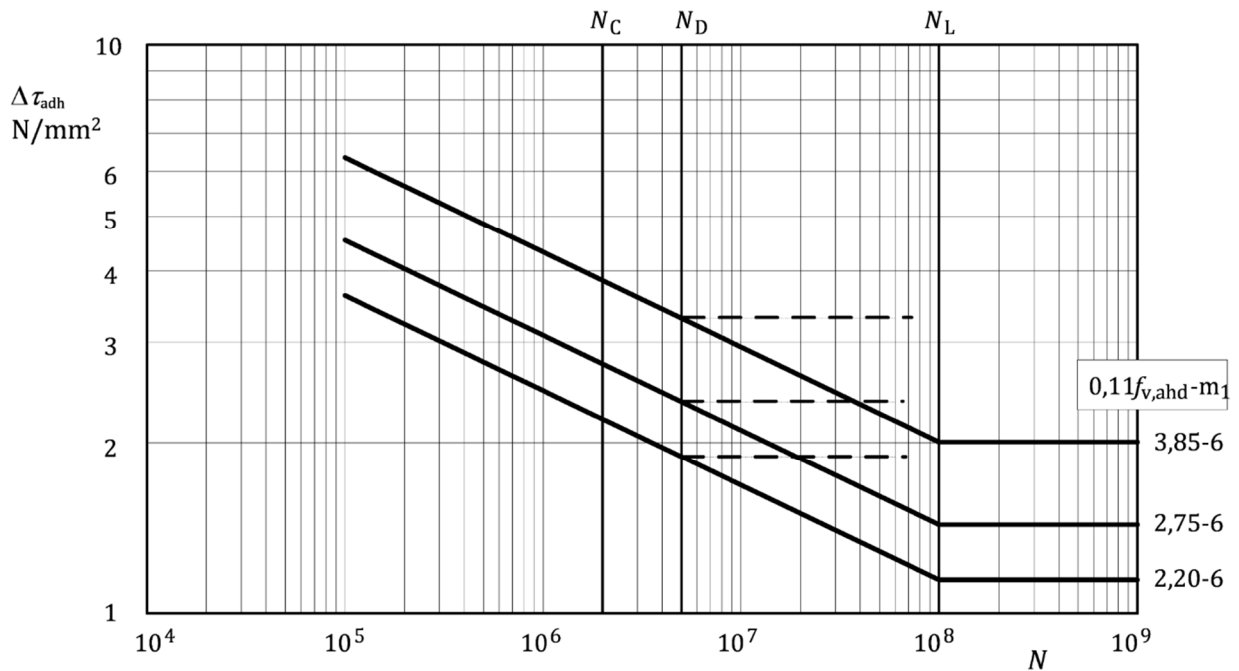
$$\Delta \tau_{C,adh} = k_{C,adh} f_{v,adh} \quad (E.1)$$

де $k_{C,adh}$ — значення коефіцієнта втомної міцності клейового з'єднання k_{adh} при $N_C = 2 \times 10^6$ циклів;

$f_{v,adh}$ — характеристична міцність на зсув клейового з'єднання, отримана в результаті стандартного статичного випробування на зсув внапусток (див. EN 1999-1-1:2023).

Таблиця Е.1 — Клейові з'єднання

Категорія деталі	Форми виробів Деталі конструкцій Місце утворення тріщин	Аналіз напружень	Вимоги до виготовлення
$0,11 f_{v,adh}$ $m_1 = 6$ $m_2 = 6$	Прокат, пресовані та ковани вироби Однокомпонентні та двокомпонентні епоксидні смоли З'єднання внапусток, товщина тоншої частини ≤ 8 мм  По лінії з'єднання на передній грані	Напруження по нормалі до передньої грані Пік напруження на передній грані, ексцентриситет траєкторії навантаження тільки в симетричних з'єднань внапусток з подвійним покриттям	Обробка тільки високошвидкісною фрезою Підготовка поверхні: знежирення або хроматичне очищення Збірка: товщина лінії з'єднання в межах допусків, визначених для випробування на зсув



Умовні позначки:

Крива втомної міцності на зсув: 3,85-6 однокомпонентний модифікований епоксидний матеріал термічного твердіння $f_{v,adh} = 35 H/mm^2$;

Крива втомної міцності на зсув: 2,75-6 двокомпонентний, холодного твердіння, модифікований епоксидний матеріал $f_{v,adh} = 25 H/mm^2$;

Крива втомної міцності на зсув: 2,20-6 двокомпонентний, холодного твердіння, модифікований акриловий матеріал $f_{v,adh} = 20 H/mm^2$.

Рисунок Е.1 — Крива втомної міцності на зсув для клейових з'єднань

Таблиця Е.2 — Числові значення для k_{adh} ($= \Delta\tau / f_{v,adh}$) для клейових з'єднань

Категорія деталі ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\tau_{C,adh} / f_{v,adh}$	m_1	$\Delta\tau / f_{v,adh}$	$\Delta\tau_D / f_{v,adh}$	$\Delta\tau_L / f_{v,adh}$
0,11	6	0,181	0,094	0,065

(5) Розрахункову залежність втомної міцності для витривалості в діапазоні від 10^5 до 5×10^6 циклів або в діапазоні від 5×10^6 до 10^8 циклів визначають згідно з 8.2.1(2) і 8.2.1(4), відповідно.

(6) До розрахункових значень міцності для клейових з'єднань рекомендовано застосовувати частковий коефіцієнт γ_{Mf} .

Примітка. Значення часткового коефіцієнту γ_{Mf} для конкретних типів деталей конструкцій становить 1,0, а для клейових з'єднань — 3,0, якщо тільки в національному додатку не наведено інші значення.

(7) Випробування відповідно до репрезентативних геометричних характеристик, якості виготовлення та режимів навантаження рекомендовано проводити для критичних випадків застосування.

(8) Дані щодо втоми для клейових з'єднань застосовують лише в діапазоні температур від мінус 20°C до плюс 60°C.

Примітка. Наведені температурні межі ґрунтуються на наявних даних випробувань. Інші значення можуть бути визначені національним додатком, якщо вони обґрунтовані випробуваннями. Настанови щодо проведення випробувань наведено в додатку С.

(9) Не рекомендовано приймати до уваги вплив середнього напруження без обґрунтування випробуваннями.

Примітка. Настанови щодо випробувань наведено в додатку С.

ДОДАТОК F

(довідковий)

ДІАПАЗОН МАЛОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ**F.1 Застосування цього довідкового додатку**

(1) Цей довідковий додаток надає настанови до 4.1 та 8.2.1 щодо діапазону малоциклової втоми.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, його можна використовувати.

F.2 Сфера та область застосування

(1) Якщо значні пошкодження спричинено високими діапазонами напружень, які прикладено менше 10^5 разів, криві втомної міцності, наведені в 8.2 для певних деталей конструкцій і R-відношень, можуть бути невиправдано занижені. Наведені нижче дані можуть бути використані для отримання більш точного прогнозу строку експлуатації.

F.3 Модифікація кривих міцності при втомі

(1) Для витривалості між 10^3 і 10^5 циклами розрахункову криву втомної міцності дозволено визначати за формулою (F.1):

$$N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff}\gamma_{Mf}} \right)^{m_0} \cdot 20^{\frac{m_0}{m_1}} \cdot 10^5 \quad (F.1)$$

де N_i — розрахункова кількість циклів до руйнування в діапазоні напружень $\Delta\sigma_i$;

$\Delta\sigma_C$ — базове значення втомної міцності при 2×10^6 циклах залежно від категорії деталі;

$\Delta\sigma_i$ — діапазон напружень для головних напружень у деталі, який є постійним для всіх циклів;

m_0 — зворотний логарифмічний нахил кривої втомної міцності в

діапазоні від 10^3 до 10^5 циклів в залежності від категорії деталі, сплаву та значення R ;

m_1 — зворотний логарифмічний нахил кривої втомної міцності, що залежить від категорії деталі;

γ_{Ff} — частковий коефіцієнт для врахування невизначеностей у спектрі навантаження та аналізі відгуку (див. 4.4);

γ_{Mf} — частковий коефіцієнт для врахування невизначеності в матеріалах та виготовленні (див. 8.2.1(2)).

F.4 Дані випробувань

(1) Рекомендовано використовувати значення m_0 , які були отримані на основі даних випробувань для окремих деталей конструкцій певних виробів з деформівних сплавів, наведених у таблиці F.1.

(2) Для R -відношень між $R = -1$ і $R = 0$ можна використовувати лінійну інтерполяцію оберненого значення m_0 .

(3) Значення R можна обчислювати на основі лише діючих напружень, без урахування залишкових напружень.

Таблиця F.1 — Значення m_0

Тип деталі	Таблиця категорій деталей	Сплави	Форма виробу	m_0	
				$R = -1$	$R \geq 0$
1.1	таблиця J.1	7020	Листові, пластинчасті та прості профілі	5,0	m_1
1.2		6000 серія ^a	Листові, пластинчасті та прості профілі	4,0	m_1
1.3		7020	Фасонні профілі	4,0	m_1
1.4		6000 серія ^a	Фасонні профілі	4,0	m_1
7.6	таблиці J.7 і J.9	EN 1999-1-1:2023, таблиця 5.1 ^a		3,0	m_1
9.1				3,0	m_1
9.2				3,0	m_1
9.3				3,0	m_1
9.4				3,0	m_1
15.1	таблиця J.15	7020	EN 1999-1-1:2023, таблиця 5.1	3,3	m_1
15.2		7020		3,3	m_1

^a винятки — див. 3(1).

ДОДАТОК G

(довідковий)

ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ R

G.1 Використання цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає настанови до пунктів 8.2, 8.3, 8.4 щодо впливу коефіцієнта асиметрії циклу R .

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, його можна використовувати.

G.2 Сфера та галузь застосування

(1) Цей довідковий додаток містить вказівки щодо підвищених значень втомної міцності для значень напружень стиску або низьких напружень розтягу.

G.3 Підвищення міцності при втомі

(1) Для значень коефіцієнта асиметрії циклу, менших за $R = +0,5$, замість $\Delta\sigma_{C(R)}$ можна використовувати розширену характеристику втомної міцності $\Delta\sigma_C$ відповідно до формули (G.1):

$$\Delta\sigma_{C(R)} = f(R)\Delta\sigma_C \quad (G.1)$$

де $f(R)$ — коефіцієнт підсилення, що залежить від R - відношення і типу елементу та деталі конструкції, як показано в G.4 нижче.

Прокатні труби та профілі (гарячекатані та холодноформовані) можуть мати залишкові напруження, якими не можна знехтувати, тому концепцію підсилення, подану в цьому додатку, застосовувати не рекомендовано.

G.4 Випадки підвищення міцності

G.4.1 Випадок 1

(1) Випадок 1 застосовний до віддалених від вузлів з'єднання місць утворення тріщин в основному металі.

(2) Рекомендовано враховувати будь-який попередній вплив або відхил від попередньо прикладених напружень.

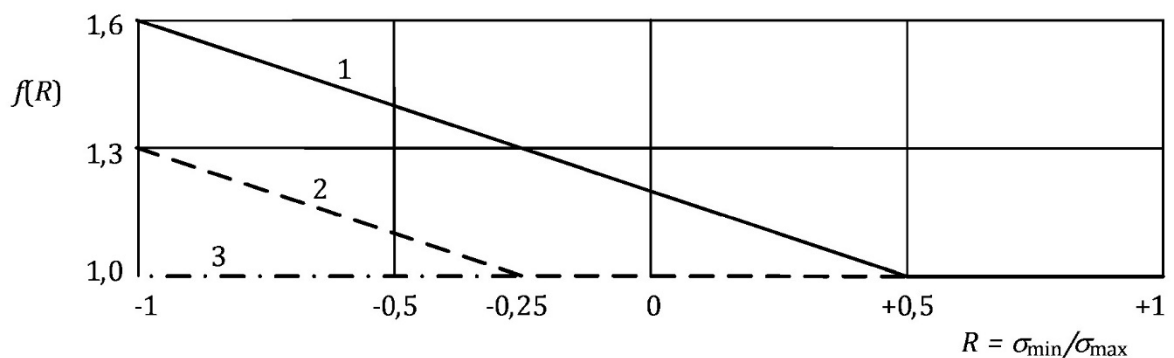
(3) Значення коефіцієнта підсилення $f(R)$ рекомендовано приймати за формулою (G.2):

$$f(R) = 1,2 - 0,4R \quad (G.2)$$

як наведено в таблиці G.1 та на рисунку G.1.

Таблиця G.1 — Значення $f(R)$ для випадку 1

R_{eff}	$f(R)$
≤ -1	1,6
> -1 $< +0,5$	$1,2 - 0,4R$
$\geq +0,5$	1,0



Умовні позначки:

1 — повністю вільні від напружень ділянки;

2 — частково вільні від напружень ділянки;

3 — ділянки із залишковими напруженнями.

Рисунок G.1 — Коефіцієнт підвищення міцності $f(R)$ при 2×10^6 циклах

G.4.2 Випадок 2

(1) Випадок 2 застосовний до місць утворення тріщин, пов'язаних зі зварними або механічними з'єднаннями в простих конструктивних елементах, де виникли залишкові напруження σ_{res} , з урахуванням будь-якого попереднього впливу або неточності монтажу.

(2) Ефективне R -відношення R_{eff} рекомендовано оцінювати за формулою (G.3):

$$R_{\text{eff}} = \frac{2\sigma_{\text{res}} - \Delta\sigma}{2\sigma_{\text{res}} + \Delta\sigma} \quad (\text{G.3})$$

де $\Delta\sigma$ — діапазон прикладених напружень

(3) Значення $f(R)$ мають бути розраховані за формулою (G.4):

$$f(R) = 0,9 - 0,4R \quad (\text{G.4})$$

Примітка. Див. також таблицю G.2 та рисунок G.1.

Таблиця F.2 — Значення $f(R)$ для випадку 2

R	$f(R)$
≤ -1	1,3
> -1 $< -0,25$	$0,9 - 0,4R$
$\geq -0,25$	1,0

G.4.3 Випадок 3

(1) Випадок 3 застосовний до з'єднань, близьких до зварних, та занадто складних вузлових з'єднань, де контроль залишкових напружень практично неможливий.

(2) У цьому випадку коефіцієнт $f(R)$ має дорівнювати одиниці для всіх R -відношень (див. також рисунок G.1).

ДОДАТОК Н

(довідковий)

ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ

Н.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток містить додаткові вказівки до 8.5 щодо підвищення втомної міцності зварних швів.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, то його можна використовувати.

Н.2 Сфера та область застосування

(1) У випадках, коли втомні тріщини виникають по кромці шва, можна підвищити міцність зварних з'єднань. Такі методи зазвичай використовують для найбільш напружених зварних швів або для вдосконалення зварних швів слабкої міцності.

(2) Нижче розглянуто наступні методи:

- механічна обробка або шліфування;
- наплавлення електродуговим або плазмовим зварюванням;
- зміцнення (дробоструминне, голчасте або молоткове).

(3) У випадках, коли було застосовано вищезазначені методи підвищення втомної міцності, можна досягти підвищення втомної міцності в середній і дальній області втомного ресурсу до 30 %, виміряного за діапазоном напружень. Найвище підвищення втомної міцності досягають поєднанням двох методів, таких як механічна обробка (або шліфування) і молоткова зміцнення, де можливе подвоєння підвищення втомної міцності за рахунок окремих методів.

(4) Для всіх методів рекомендовано враховувати наступні аспекти:

- а) має бути доступна відповідна робоча процедура;

b) перед застосуванням заходів з підвищення втомної міцності рекомендовано переконатися у відсутності поверхневих тріщин у небезпечних місцях. Це рекомендовано робити за допомогою проникаючого барвника або інших відповідних методів неруйнівного контролю;

c) на ділянці короткого терміну служби, де локальні напруження перевищують межу текучості, період появи тріщини становить незначну частку (незалежно від типу надрізу), і тому підвищення втомної міцності є незначним. При 10^5 циклах підвищення втомної міцності не спостерігається. (Крива втомної міцності, таким чином, повертається з фіксованими значеннями при 10^5);

d) рекомендовано враховувати потенційні місця втомного руйнування, відмінні від тих, що підлягають покращенню: наприклад, якщо кромка зварного шва буде покращена, то такі місця, як тіло зварного шва або внутрішні тріщини (часткове проникнення), можуть бути обмежуючим чинником;

e) рекомендовано враховувати втомну довговічність і корисність методів підвищення втомної міцності;

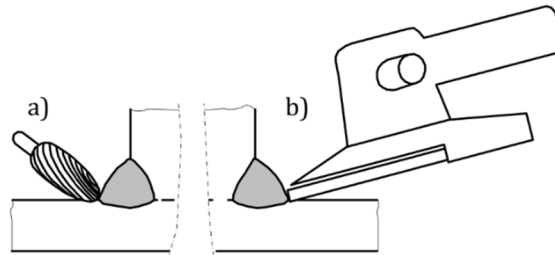
f) в умовах вільної корозії у воді підвищення втомної міцності часто втрачається. Методи, які враховують залишкові напруги стиску (нагартування), є менш чутливими. Тому для досягнення підвищення втомної міцності необхідний антикорозійний захист.

(5) Розрахункові значення для покращених зварних швів мають бути встановлені шляхом випробувань, див. додаток С.

Н.3 Механічна обробка або шліфування

(1) Обробку дозволено виконувати високошвидкісною борфрезою, що має такі переваги, як більш точне визначення радіусу, залишення слідів паралельно напрямку напружень та доступ до кутів. В якості альтернативи можна використовувати дискову шліфувальну

машину, якщо дозволяє доступ, див. рисунок Н.1. В обох випадках рекомендовано правильно вибрати радіус ріжучої кромки або вістря.



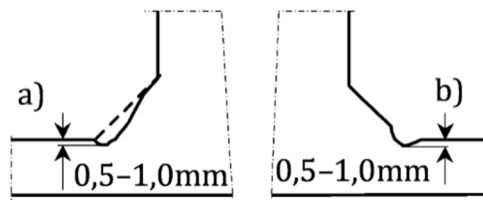
Умовні позначки:

a) — обробка задирок;

b) — дискове шліфування

Рисунок Н.1 — Методи обробки/шліфування

(2) Щоб забезпечити видалення інтрузій тощо, обробку задирок рекомендовано продовжити на глибину мінімум 0,5 мм нижче нижньої частини будь-якого видимого підрізу тощо, але не більше 2 мм або 5% від товщини пластини, залежно від того, що менше (див. рисунок Н.2). Незначне зменшення товщини листа і відповідне збільшення номінального напруження є несуттєвим для товщини 10 мм і більше. У разі багатопрохідних зварних швів рекомендовано обробляти щонайменше два зварних шви. Також рекомендовано подбати про те, щоб забезпечити необхідний катет шва.



Умовні позначки:

a) — повний профіль;

b) — кромка зварного шва.

Рисунок Н.2 — Геометрія профілю

Н.4 Наплавлення за допомогою дугового або плазмового зварювання

(1) Хоча дугове зварювання є практичним процесом лише для

конструкцій, виготовлених з листів товщиною 4 мм або менше, його можна використовувати для покращення втомної міцності у випадках, коли критичним місцем є кромка зварного шва. При повторному оплавленні наявні включення та підрізи в області кромки зварного шва дозволено видалити, а радіус кромки можна збільшити, що зменшує коефіцієнт локальної концентрації напружень.

(2) Рекомендовано використовувати стандартне обладнання для дугового зварювання без додавання будь-якого присадного матеріалу. Процес дугового зварювання чутливий до навичок оператора. Важливо мати чисті поверхні, щоб уникнути утворення пор. Мають бути підготовлені детальні процедури.

(3) Підвищення втомної міцності має бути підтверджено випробуваннями.

Н.5 Нагартування

(1) Найбільші переваги зазвичай досягають методами, в яких створено залишкові напруження стиску. Найпоширенішими методами є молоткове, голчасте та дробоструминне зміцнення. Зміцнення — це процес холодної обробки, при якому вплив обладнання провокує появу на поверхні пластичних деформацій. Навколишній (пружний) матеріал буде стискати деформований об'єм. Висока стискальна дія може зменшити рівень залишкових напружень і має бути врахована під час застосування спектрів випадкового впливу.

(2) Рекомендовано підготувати процедури для всіх методів зміцнення: проходи, деформація кромки зварного шва і заглиблення для зміцнення молотком і пучком дроту; інтенсивність, покриття і деформація смуги Альмена для зміцнення дробоструменевим способом.

ДОДАТОК І

(довідковий)

ЛИТТЯ

I.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає вказівки до 5, 8.1.3 щодо лиття.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, то його можна використовувати.

I.2 Сфера та область застосування

(1) Наведені нижче дані дозволено використовувати для лиття за умови застосування правил розрахунку напружень, наведених у EN 1999-1-1:2023, Е.1.

(2) Правила проєктування, наведені в цьому стандарті для лиття під втомним навантаженням, для сплавів, наведених в EN 1999-1-1:2023, Таблиця 5.8, можна використовувати за умови дотримання додаткових вимог, наведених в І.4.

I.3 Дані про втомну міцність

I.3.1 Ливарний матеріал

(1) Залежно від необхідного рівня якості, див. І.4, можна застосовувати числові значення для $\Delta\sigma$ з таблиці І.1

Таблиця І.1 — Числові значення $\Delta\sigma$ (Н/мм²) для вихідного матеріалу

Категорія деталі ($N_C = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 2 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_C$	$m_1 = m_2$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
71 ^a	7	108,9	71	40,6
50	7	76,7	50	28,6
40	7	61,4	40	22,9
32	7	49,1	32	18,3
25	7	38,4	25	14,3
^a див. Примітку в І.4				

І.3.2 Зварний матеріал

(1) Значення втомної міцності для зварного лиття в цьому стандарті не розглядають.

Примітка. Значення втомної міцності для зварних з'єднань лиття можуть бути визначені в національному додатку.

І.3.3 Механічно з'єднані литі елементи

І.3.3.1 Болтові з'єднання

(1) Втомна міцність болтових з'єднань залежить від втомної міцності основного матеріалу. Числові значення $\Delta\sigma$ з таблиці І.2 можна застосовувати для болтових з'єднань категорії А: Тип опори, див. EN 1999-1-1:2023, 10.5.3.

Таблиця І.2 — Числові значення $\Delta\sigma$ (Н/мм²) для болтових з'єднань

Категорія деталі ($N_C = 2 \times 10^6$) для основного матеріалу	Відповідна категорія деталі ($N_C = 2 \times 10^6$) для болтових з'єднань		$N = 10^5$	$N_D = 2 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
	$\Delta\sigma_C$	$m_1 = m_2$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
71	45	4	95,2	35,8	16,9
50	40	4	84,6	31,8	15,0
40	25	4	52,9	19,9	9,4
32	20	4	42,3	15,9	7,5
25	16	4	33,8	12,7	6,0

I.3.3.2 Штифтові з'єднання

(1) Значення втомної міцності для штифтових з'єднань в цьому стандарті не розглядають.

Примітка 1. Значення втомної міцності, наведені в таблиці J.15 для болтових з'єднань, можуть бути використані за умови, що проектний аналіз адекватно і надійно враховує розподіл напружень вздовж штифта і елемента, наприклад, за допомогою геометричного розрахунку напружень.

Примітка 2. Значення втомної міцності для штифтових з'єднань литих елементів можна визначити в національному додатку.

I.3.4 Клейове з'єднання литих елементів

(1) Клейові з'єднання для литих елементів в цьому стандарті не розглядають.

Примітка. Значення втомної міцності для клейових з'єднань литих елементів можуть бути визначені в національному додатку.

I.4 Вимоги до якості

(1) Категорії деталей для литих елементів залежать від (або визначають за допомогою) максимального діаметру пор згідно з таблицею I.3.

Таблиця I.3 — Значення максимального діаметра пор (мм) для литих елементів

Категорія деталі ($N_C = 2 \times 10^6$)	Максимальний діаметр отворів
71	0,2
50	0,5
40	0,9
32	1,5
25	2,0 (нормальний)

Примітка. Виготовлення литих елементів з діаметром пор менше 0,6 мм потребує спеціальних навичок, досвіду, а також техніки і технології лиття. Крім

прДСТУ EN 1999-1-3:202X

того, виявлення пор менше 0,6 мм потребує спеціального обладнання, особливо для діапазону до 0,2 мм, де можливість виявлення дефектів такого розміру залежить також від форми (товщини) литих елементів. Припущення щодо властивостей матеріалу литих елементів, які будуть використані в розрахунках конструкції, можуть бути підтверджені виробником литих елементів.

ДОДАТОК J

(довідковий)

ТАБЛИЦІ КАТЕГОРІЙ ДЕТАЛЕЙ

J.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає вказівки до 4.2.1, 4.5.2(1), 8.1.3, 8.2.1, 8.2.4, A.5.1, A.5.3, K.2, L щодо категорій деталей.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатку наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатку, його можна використовувати.

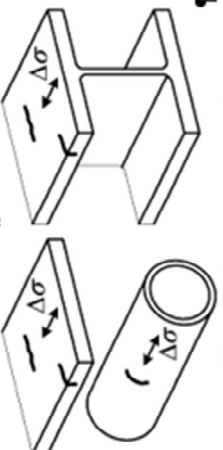
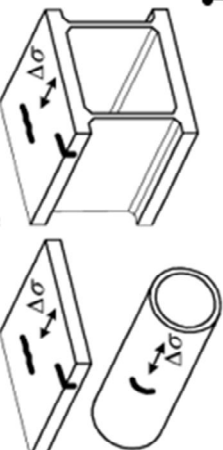
J.2 Сфера та область застосування

(1) Додаткові вказівки щодо категорій деталей наведено в таблицях J.1-J.18, а щодо залежностей $\Delta\sigma - N$ - на рисунках J.1-J.9.

(2) Категорії деталей, наведені в таблицях J.1-J.18, і залежності $\Delta\sigma - N$, наведені на рисунках J.1 - J.9, можна використовувати тільки з урахуванням положень розділу 8.

(3) Значення категорії деталі дійсні для температури навколишнього середовища, зовнішніх впливів, які не вимагають захисту поверхні (див. таблицю 8.2), а також вимог щодо виготовлення згідно EN 1090-3. Ці значення отримані для коефіцієнта асиметрії циклу не менше 0,5.

Таблиця J.1 — Категорія деталей для плоских елементів

Тип-деталі ^α	Категорія-деталі- $\Delta\sigma - m_1$ ^α Обмеження-за сплавом ^α	Форми-виробів [¶] Деталі-конструкції [¶] Місце-виникнення-тріщин ^α	Орієнтація-напруження ^α	Аналіз-напружень ^α	Вимоги-щодо-виготовлення ^α
1.1 ^α	125-7 [¶] 7020-тіпські ^α	Листи, пластили та прості-пресовані-прути і-стержні, деталі, що піддані механічній-обробці- [¶]	Паралельно-або-нормально-до-напряму-прокату-або-пресування- [¶] Якщо-напрямок-напружень-нормальний-до-напряму-пресування, рекомендовано-проконсультуватися-з-виробником-щодо-забезпечення-якості-у-разі-пресування-за-допомогою-матриці-з-отвором-або-комбінованої-матриці ^α		Відсутність-вхідних-кутів-у-профілі, відсутність-контакту-з-іншими-деталлями [¶] Оброблені-поверхні-з-шорсткістю- $R_{zs} < 40 \mu m$ [¶] Візуальний-контроль ^α
1.2 ^α	90-7 ^α	 Нерівність-поверхні ^α		Основне-номінальне-напруження-в-місці-виникнення-тріщин ^α	Поверхня-без-гострих-кутів, крім-тих, що-паралельні-напряму-напружень, грані-без-концентраторів-напружень ^α
1.3 ^α	80-7 [¶] 7020-тіпські ^α	Листи, плити, профілі, труби, ковани вироби- [¶]			Ручне-шліфування-не-дозволено, якщо-воно-не-паралельне-напряму-напружень [¶] Відсутність-відміток-поперек-напряму-напружень [¶] Візуальний-контроль ^α
1.4 ^α	71-7 ^α	 Нерівність-поверхні ^α			

Кінець таблиці J.1

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$ Обмеження за сплавом	Форми виробів Деталі-конструкції Місце виникнення тріщин	Орієнтація напруження	Аналіз напружень	Вимоги щодо виготовлення	
1.5	140-7 7020-тілки	Virizi, otvori Nerivnist' poverykhi	Паралельно або нормально до напрямку прокату або пресування. Якщо напружень до нормального напрямку пресування, слід проконсультуватися з виробником щодо забезпечення якості у разі пресування за допомогою матриці з отвором або комбінованої матриці	Враховання концентрації напружень див. D.2	Поверхня без гострих кутів, крім тих, що паралельні напрямку напружень, без грані без концентраторів напружень	Отвори, просвердлені та розточені Відсутність задирок у попереку орієнтації напружень Візуальний контроль
1.6	100-7					

a. $m_1 = m_2$, межа втоми з постійною амплітудою при 2×10^6 циклах

b. значення R_{25} див. в EN ISO 4287 та EN ISO 4288

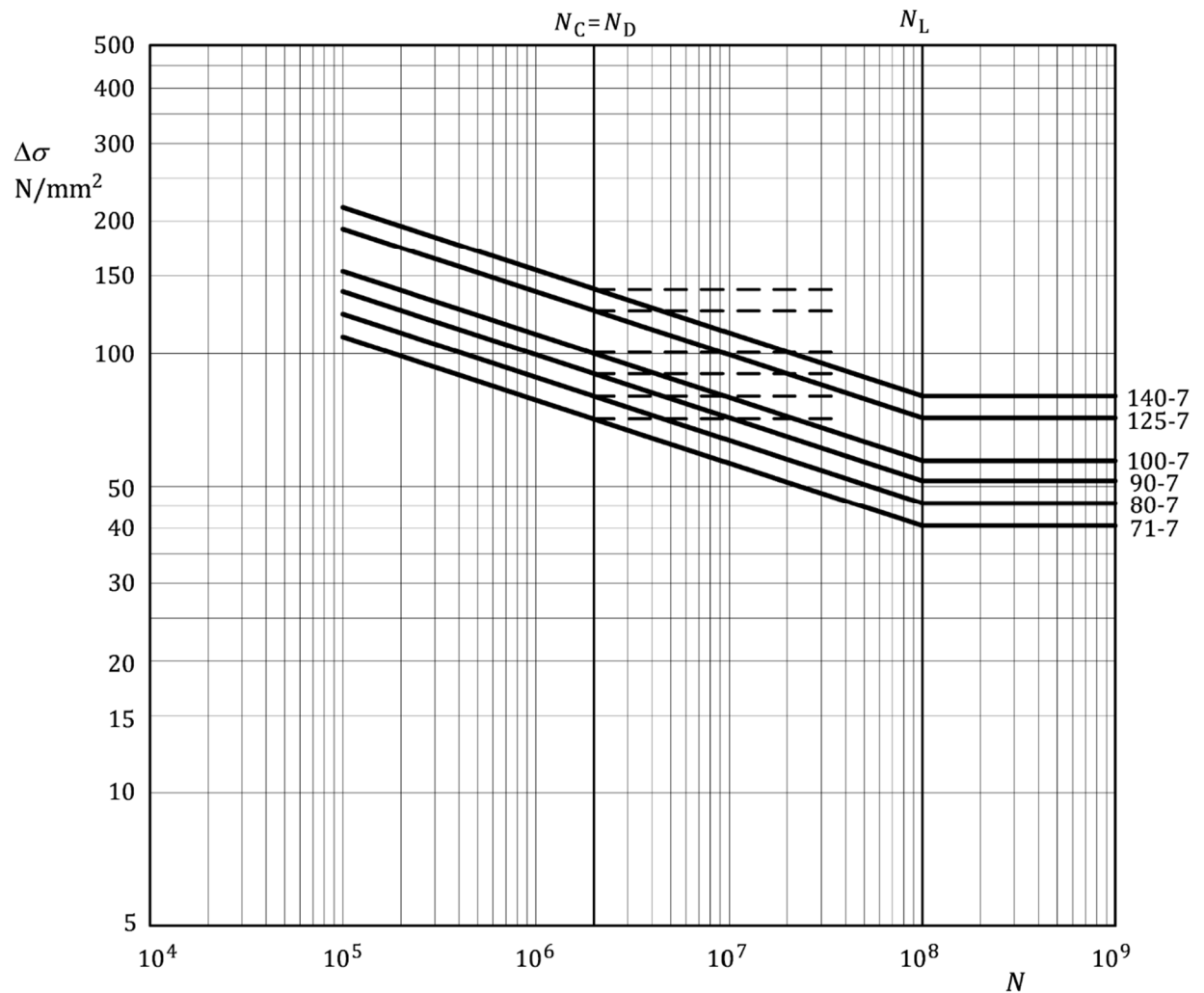
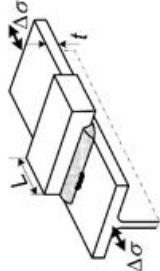
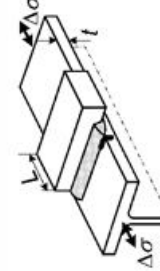
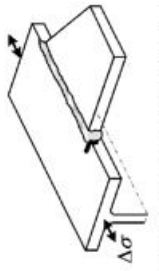


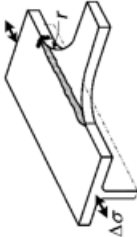
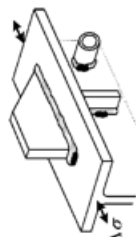
Рисунок J.1 — Криві втомної міцності для плоских елементів — категорії деталей відповідно до таблиці J.1

Таблиця J.2 — Числові значення $\Delta\sigma$ (N/mm^2) для плоских елементів — категорії деталей відповідно до таблиці J.1

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
140-7	7,0	7,0	214,8	154,6	140,0	122,8	111,2	80,1	80,1
125-7	7,0	7,0	191,8	138,0	125,0	109,7	99,3	71,5	71,5
100-7	7,0	7,0	153,4	110,4	100,0	87,7	79,5	57,2	57,2
90-7	7,0	7,0	138,1	99,4	90,0	79,0	71,5	51,5	51,5
80-7	7,0	7,0	122,7	88,3	80,0	70,2	63,6	45,7	45,7
71-7	7,0	7,0	108,9	78,4	71,0	62,3	56,4	40,6	40,6

Таблиця J.3 — Категорії деталей для елементів зі зварними накладками — край лобового зварного шва

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^{a, b}$	Деталі конструкції Місце виникнення тріщин	Розміри (мм)	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення	
				Параметр напружень	Дозволене напруження для	-	Рівень якості ^c
3.1	32-3,4	 На краю лобового зварного шва на напруженому елементі, віддаленому від краю (зварний шов продовжується вздовж кромки фланця)	$L \leq 20$				C
3.2	25 – 3,4 $t \leq 4$ 23 – 3,4 $4 < t \leq 10$ 20 – 3,4 $10 < t \leq 15$		$L > 20$				C
3.3	28 – 3,4	 На краю лобового зварного шва напруженого елемента в куті (зварний шов продовжується вздовж кромки фланця)	$L \leq 20$	Номінальне напруження в місці виникнення тріщин	Підвищення жорсткості за рахунок накладки	Зашліфувати зріз до гладкого стану	C
3.4	23 – 3,4 $t \leq 4$ 20 – 3,4 $4 < t \leq 10$ 18 – 3,4 $10 < t \leq 15$		$L > 20$				C
3.5	18 – 3,4	 Поверхня торця елемента	Без радіусу				C

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a, b$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Розміри (мм)	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення	
				Параметр напружень	Дозволене напруження для	-	Рівень якості ^c
3.6	36 – 3,4	 У тілі зварного шва на краю	$r \geq 50$	Номінальне напруження в місці виникнення тріщин	Підвищення жорсткості за рахунок накладки	Радіус шліфування паралельний напрямку напружень.	C
3.7	36 – 3,4	 У тілі зварного шва на краю кінця шва	$r \geq 50$	-	-	Край зварного шва має бути повністю зашліфований	C
3.8	23 – 3,4	 На поверхні елемента в лобовому зварному шві	Без радіусу	-	-	-	C
^a $m_2 = m_1 + 2$ ^b Для плоских елементів під дією згинальних напружень, див. 8.2.1(11) і категорію деталей збільшити на два. ^c Відповідно до EN ISO 10042:2018.							

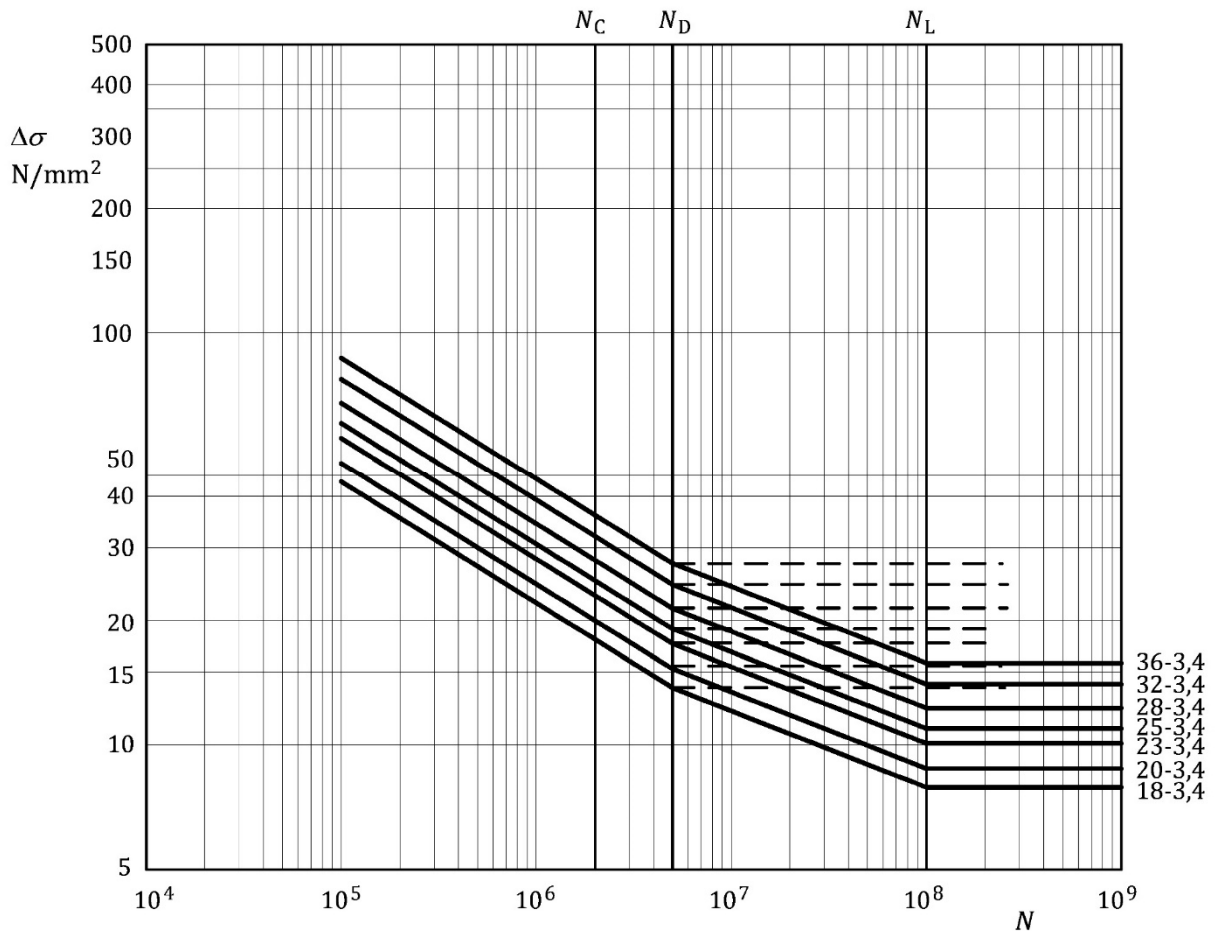
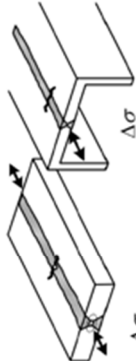


Рисунок J.2 — Криві втомної міцності для зварних накладок, країв лобових зварних швів — категорії деталей відповідно до таблиці J.3

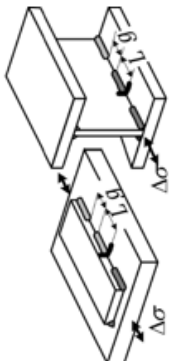
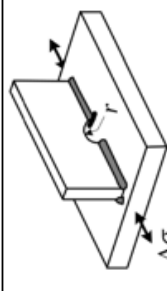
Таблиця J.4 — Числові значення $\Delta\sigma$ (Н/мм²) для зварних накладок, країв лобових зварних швів — категорії деталей відповідно до Таблиці J.3

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
36–3,4	3,4	5,4	86,9	44,1	36,0	27,5	24,2	15,8	15,8
32–3,4	3,4	5,4	77,2	39,2	32,0	24,4	21,5	14,0	14,0
28–3,4	3,4	5,4	67,6	34,3	28,0	21,4	18,8	12,3	12,3
25–3,4	3,4	5,4	60,3	30,7	25,0	19,1	16,8	11,0	11,0
23–3,4	3,4	5,4	55,5	28,2	23,0	17,6	15,5	10,1	10,1
20–3,4	3,4	5,4	48,3	24,5	20,0	15,3	13,4	8,8	8,8
18–3,4	3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9

Таблиця J.5 — Категорії деталей для елементів з поздовжніми зварними швами

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювання	Внутрішній	Рівень якості ^b Поверхні та геометричні форми	
5.1	63–4,3	 При розриві зварного шва	Зварювання встик з повним проваром Зварювальне підсилення зашліфоване врівень з поверхнею	Номінальне напруження в місці виникнення тріщин	-	Безперервне автоматичне зварювання	V	C	e
5.2	56–4,3					-	C	C	
5.3	45–4,3	 При розриві зварного шва	Зварювання встик із повним проваром	Номінальне напруження в місці виникнення тріщин	-	Будь-які опорні стержні повинні бути суцільними	C	D	
5.4	45–4,3	 При розриві зварного шва	Безперервний зварний шов внапусток			-	B	C	
5.5	40–4,3					-	C	D	

Кінець таблиці J.5

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювання	Рівень якості ^b		
							Внутрішній	Поверхні та геометричні форми	
5.6	36-4,3	 Зварювальний шов або зварювальна ванна	Переривчастий шов з проміжними швами $q \leq 25L$	-	-	C	D		
5.7	28-4,3	 Зварювальний шов або зварювальна ванна	Отвір в з'єднанні з центром по осі зварного шва $r' \leq 25$	-	Наявність отвору в з'єднанні	-	C	D	
^a $m_2 = m_1 + 2$ ^b Відповідно до EN ISO 10042:2018. ^c Розрив у напрямку поздовжнього зварного шва не має бути довшим за 1/10 товщини листа або мати нахил, крутіший за 1:4.									

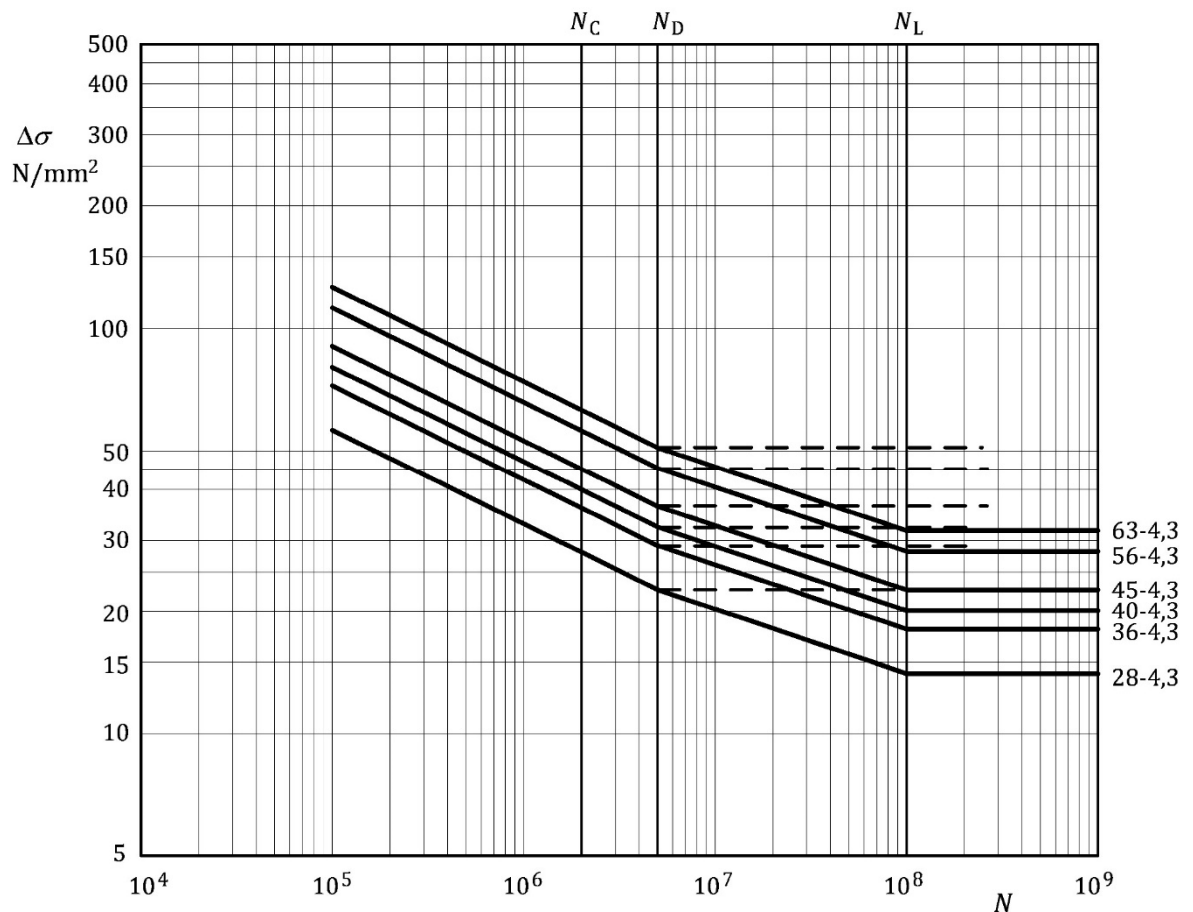
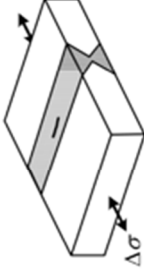


Рисунок J.3 — Криві втомної міцності для елементів з поздовжніми зварними швами — категорії деталей відповідно до таблиці J.5

Таблиця J.6 — Числові значення $\Delta\sigma$ (Н/мм²) з поздовжніми зварними швами — категорії деталей відповідно до таблиці J.5

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
63-4,3	4,3	6,3	126,4	74,0	63,0	50,9	45,6	31,6	31,6
56-4,3	4,3	6,3	112,4	65,8	56,0	45,3	40,5	28,1	28,1
45-4,3	4,3	6,3	90,3	52,9	45,0	36,4	32,6	22,6	22,6
40-4,3	4,3	6,3	80,3	47,0	40,0	32,3	29,0	20,1	20,1
36-4,3	4,3	6,3	72,3	42,3	36,0	29,1	26,1	18,1	18,1
28-4,3	4,3	6,3	56,2	32,9	28,0	22,6	20,3	14,1	14,1

Таблиця J.7 — Категорії деталей для стикових зварних з'єднань між елементами

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Елементи, що з'єднуються	Аналіз напружень	Вимоги щодо виготовлення			Додатково
						Вимоги до зварювання	Внутрішній	Поверхні та геометричні форми	
7.1.1	56-7		Повний провар, зварні шви зашліфовані в рівень з поверхнею з обох боків	Пластини, твёрдотільні елементи	Лінійні «нетто»	Вивідні планки з подальшим випученням і шліфуванням деталей у напрямі дії напружень	V	V	c
7.1.2	45-7			Елементи відкритого профілю			C	C	c
7.2.1	50-4,3		Приварені з обох боків, повний провар	Пластини, твёрдотільні елементи	Лінійні «нетто»	Вивідні планки з подальшим випученням і шліфуванням деталей у напрямі дії напружень	V	V	c, d
7.2.2	40-3,4			Елементи відкритого профілю			V	C	c
7.2.3	36-3,4			Елементи відкритого профілю			C	C	c
7.3.1	40-4,3		Зварюється тільки з одного боку, повне проварювання з постійною підкладкою	Пластини, твёрдотільні елементи	Лінійні «нетто»	Вивідні планки з подальшим випученням і шліфуванням деталей у напрямі дії напружень	C	C	c
7.3.2	32-3,4			Елементи відкритого профілю, профільні та круглі труби			C	C	c
7.4.1	45-4,3		Кромка зварного шва	Пластини, твёрдотільні елементи	Лінійні «нетто»	Вивідні планки з подальшим випученням і шліфуванням деталей у напрямі дії напружень	V	V	c, e
7.4.2	40-4,3			Елементи відкритого профілю, профільні та круглі труби			C	C	c

Кінець таблиці J.6

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Елементи, що з'єднуються	Аналіз напружень	Вимоги щодо виготовлення			Додатково
						Вимоги до зварювання	Рівень якості ^b		
							Внутрішній	Поверхні та геометричні форми	
7.4.3	32-3,4	 Кромка зварного шва	Зварюється тільки з одного боку, повний провар без підкладки	Елементи відкритого профілю, та профільні та круглі труби			C	C	
7.5	18-3,4	 Зварний шов	Неповний провар	-	Розмір шва «нетто»	Вивідні планки подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень	D	D	-
7.6	36-3,4	 Кромка зварного шва	Повний провар	-	Переріз «нетто» ^f	-	B	B	-

^a $m_2 = m_1 + 2$
^b Відповідно до EN ISO 10042:2018.
^c Нахил конуса < 1:4 при зміні ширини або товщини.
^d Кут охоплення $\geq 150^\circ$ для обох сторін шва.
^e Кут охоплення $\geq 150^\circ$.
^f Концентрація напружень від підвищення жорсткості поперечним елементом вже врахована.

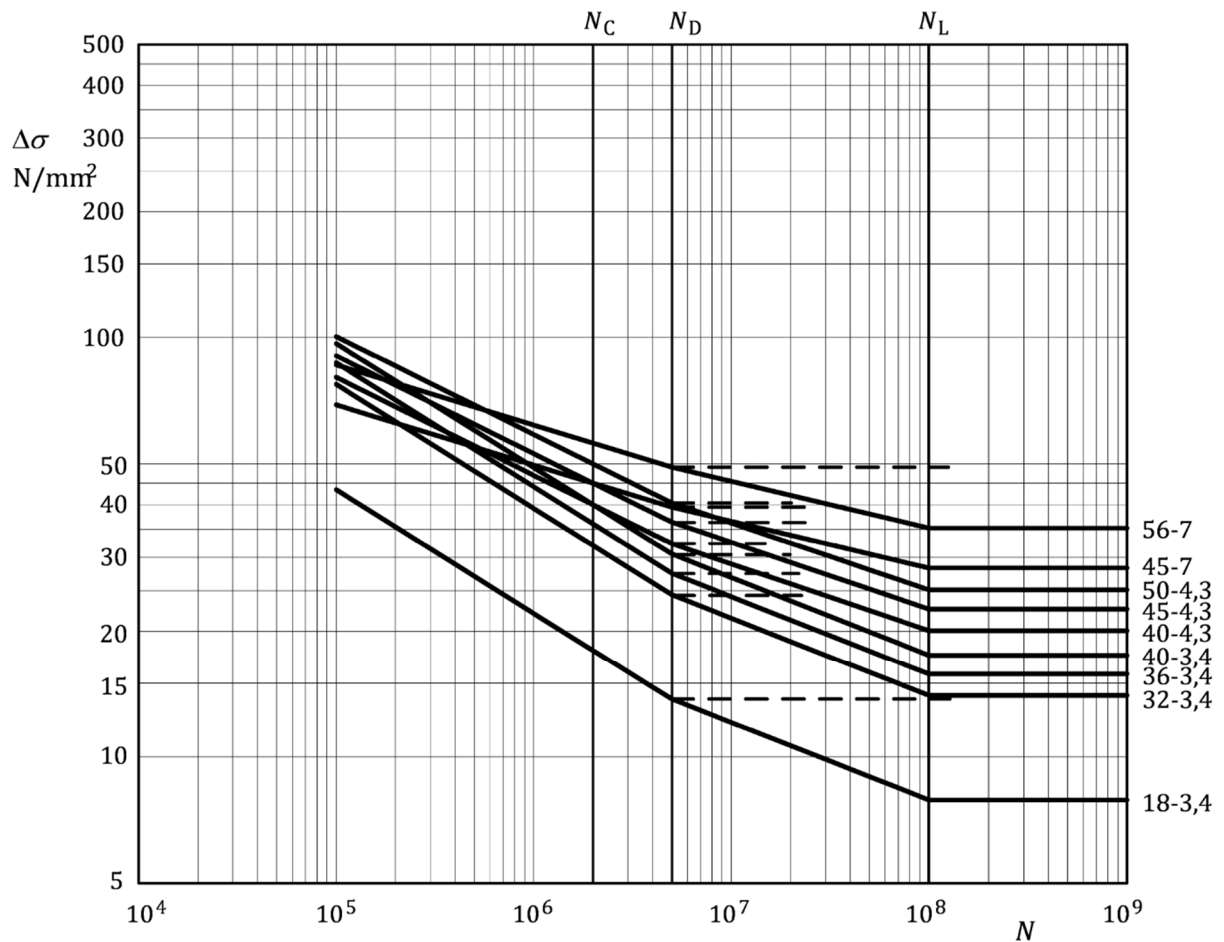
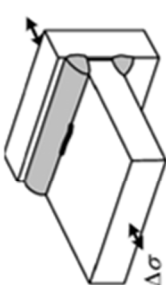
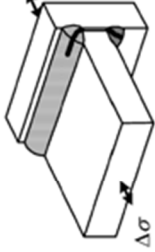


Рисунок J.4 — Криві втомної міцності для стикових зварних з'єднань між елементами — категорії деталей відповідно до Таблиці J.7

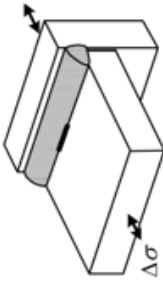
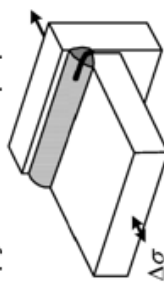
Таблиця J.8 — Числові значення $\Delta\sigma$ (Н/мм²) для стикових зварних з'єднань між елементами — категорії деталей відповідно до таблиці J.7

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
56–7	7	9	85,9	61,8	56,0	49,1	45,5	35,2	35,2
45–7	7		69,0	49,7	45,0	39,5	36,6	28,3	28,3
50–4,3	4,3	6,3	100,4	58,7	50,0	40,4	36,2	25,1	25,1
45–4,3	4,3	6,3	90,3	52,9	45,0	36,4	32,6	22,6	22,6
40–3,4	3,4	5,4	96,5	49,0	40,0	30,6	26,9	17,5	17,5
40–4,3	4,3	6,3	80,3	47,0	40,0	32,3	29,0	20,1	20,1
36–3,4	3,4	5,4	86,9	44,1	36,0	27,5	24,2	15,8	15,8
32–3,4	3,4	5,4	77,2	39,2	32,0	24,4	21,5	14,0	14,0
18–3,4	3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9

Таблиця J.9 — Категорії деталей для кутових зварних з'єднань між елементами

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювання	Рівень якості ^d	Поверхні та геометричні форми	
9.1	28–3,4	 Кромка зварного шва	Двосторонній зварний шов із валиком або неповним проваром; тріщина кромки зварного шва (див. також пункти 9.2 або 9.6)	Переріз «нетто»	Вплив поперечного елемента на жорсткість	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	C	C	-
9.2	25–3,4	 Зварний шов	Двосторонній зварний шов із валиком або з неповним проваром; тріщина в корені шва (див. також п. 9.1)	Тіло шва «нетто»	Вплив поперечного елемента на жорсткість	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	C	C	-

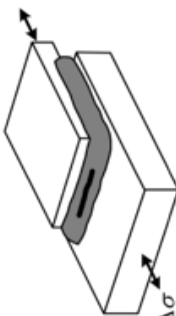
Продовження таблиці J.9

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювання	Вимоги щодо виготовлення		Додатково
				Параметр напружень	Вплив			Внутрішній	Поверхні та геометричні форми	
9.3	28-3,4	Трубчастий переріз  Кромка зварного шва	Односторонній шов з валиком або неповним проваром; тріщина кромки зварного шва при $a/t \leq 1,1$	Переріз «нетто»	Вплив поперечного елемента на жорсткість	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	C	C	-	
9.4	25-3,4	Трубчастий переріз^e  Зварний шов	Односторонній шов з валиком або неповним проваром; тріщина в корені шва при $a/t \leq 1,1$	Тіло шва «нетто»	Вплив поперечного елемента на жорсткість	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	C	C	-	

Продовження таблиці J.9

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювання	Внутрішній	Поверхні та геометричні форми	
9.5	32–3.4	Нетрубчастий переріз  Зварний шов	Односторонній шов з валиком або неповним проваром	Тіло шва «нетто» ^c	Вплив поперечного елемента на жорсткість	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	C	C	-
9.6	23–3.4	 Кромка зварного шва	Кутовий шов	Переріз «нетто»	Пік напружень на кінцях шва	-	C	C	-
9.7	18–3,4	 Кромка зварного шва	Кутовий шов	Переріз «нетто»	-	-	C	C	-

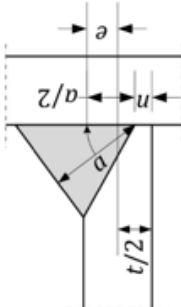
Rsytwm таблиці J.9

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювання	Рівень якості ^d		
							Внутрішній	Поверхні та геометричні форми	
9.8	14-3,4	 Зварний шов	Кутовий шов	Тіло шва «нетто», див. 7.4.2	-	-	C	C	-

^a $m_2 = m_1 + 2$

^b Невеликий провар потрібен навіть для зварних швів внапусток.

^c Помножити чисте напруження в зоні зварювання на коефіцієнт $(1 + 6e/a)$, де a — зона зварювання, включаючи проплавлення, а e — ексцентриситет між повернутим зварювальним швом і пластинкою; $e = n + a/2 - t/2$.



^d Відповідно до EN ISO 10042:2018.

^e Може також застосовуватися на деталях, де геометрія, умови навантаження і деформації пластин із своєї площини такі ж, як і для трубчастих перерізів.

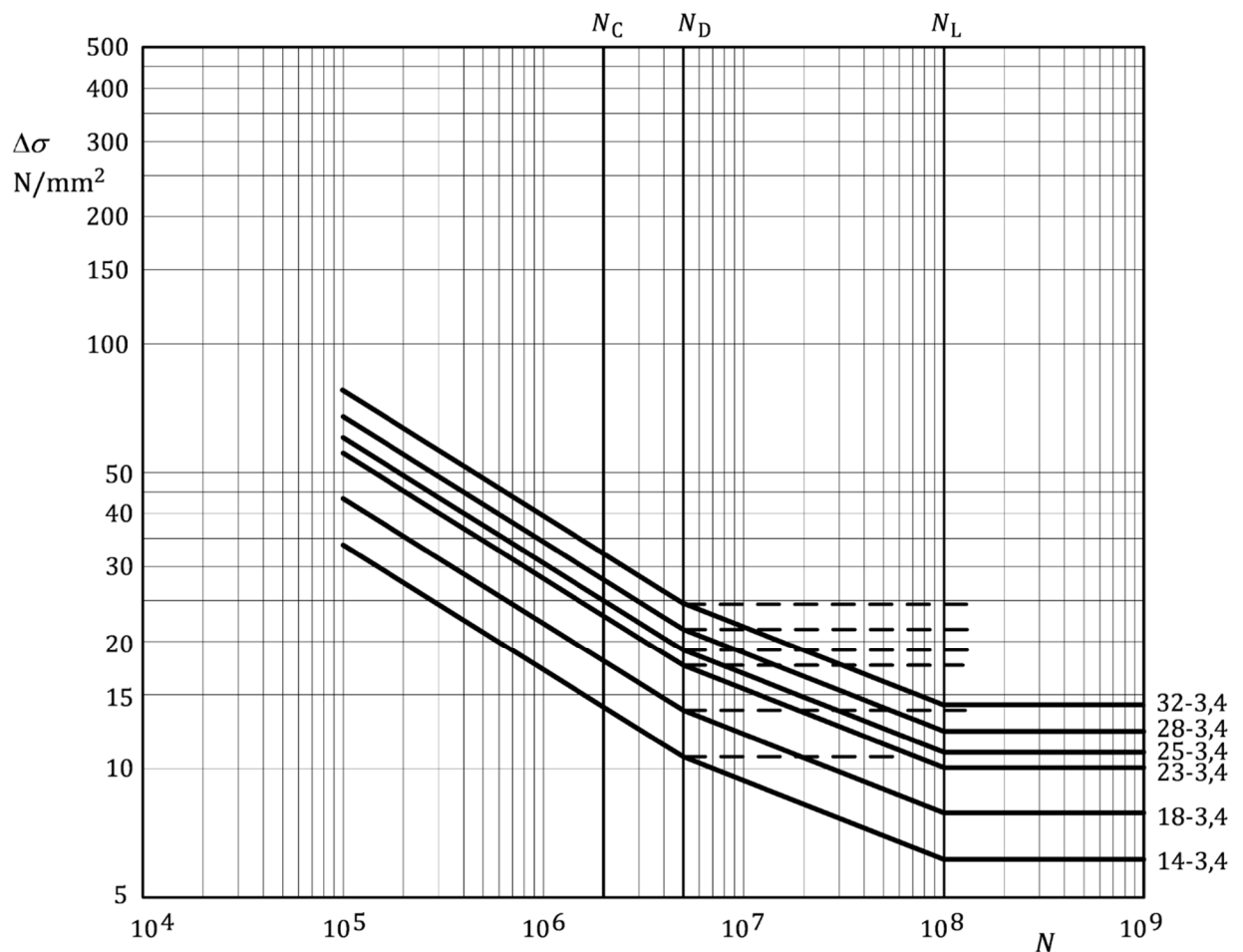
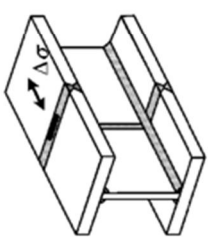
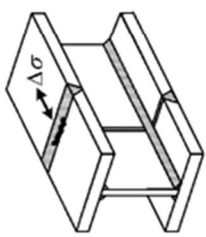


Рисунок J.5 — Криві втомної міцності для кутових зварних з'єднань між елементами — категорії деталей відповідно до Таблиці J.9

Таблиця J.10 — Числові значення $\Delta\sigma$ (N/mm^2) для кутових зварних з'єднань між елементами — категорії деталей відповідно до таблиці J.9

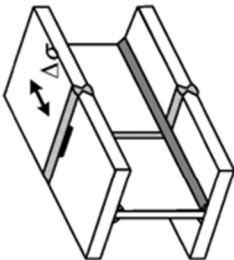
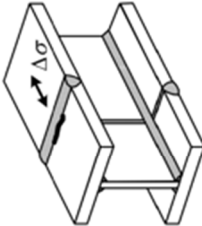
Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
32-3,4	3,4	5,4	77,2	39,2	32,0	24,4	21,5	14,0	14,0
28-3,4	3,4	5,4	67,6	34,3	28,0	21,4	18,8	12,3	12,3
25-3,4	3,4	5,4	60,3	30,7	25,0	19,1	16,8	11,0	11,0
23-3,4	3,4	5,4	55,5	28,2	23,0	17,6	15,5	10,1	10,1
18-3,4	3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9
14-3,4	3,4	5,4	33,8	17,2	14,0	10,7	9,4	6,1	6,1

Таблиця J.11 — Категорії деталей для перехресних зварних швів на балках складеного перерізу

Тип деталі	Категорія деталей $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва ^{b, c}	Аналіз напружень	Вимоги щодо виготовлення			Додатково	
					Вимоги до зварювання	Рівень якості ^d			
						Внутрішній	Поверхні та геометричні форми		
11.1	40–3,4	 Зварний шов	Двостороннє стикове зварене з'єднання, повний провар, зварні шви зашліфовані в рівень з поверхню з обох боків	Переріз «нетто»	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	Відшліфовані корені швів	В	В	Для зварних швів типу "стінка - фланець", див. Таблицю J.5, номер типу 5.4 або 5.5
11.2	40–3,4	 Зварний шов	Односторонній стиковий зварний шов, повний провар, тіло і корінь зварних швів зашліфовані в рівень з поверхню з обох боків	Переріз «нетто»	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	-	В	В	

Продовження таблиці J.11

11

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва ^{b, c}	Аналіз напружень	Вимоги щодо виготовлення				Додатково	
					Вимоги до зварювання	Рівень якості ^d		Внутрішній		Поверхні та геометричні форми
11.3	36-3,4	 Кромка зварного шва	Двостороннє стикове зварене з'єднання, повний провар	Переріз «нетто»	Вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	Кут охоплення $\geq 150^\circ$, відшліфовані корені швів	В	С		
11.4	32-3,4	 Кромка зварного шва	Односторонній стиковий зварний шов, повний провар	Переріз «нетто»	вивідні планки з подальшим вилученням і шліфуванням деталей з'єднання у напрямі дії напружень $\Delta\sigma$	-	С	С	Для зварних швів типу "стінка - фланець", див. Таблицю J.5, номер типу. 5.4 або 5.5	
^a $m_2 = m_1 + 2$ ^b Стикове з'єднання стінки та полки перед остаточним приварюванням поздовжніми швами. ^c Нахил конуса < 1:4 при зміні ширини або товщини. ^d Відповідно до EN ISO 10042:2018.										

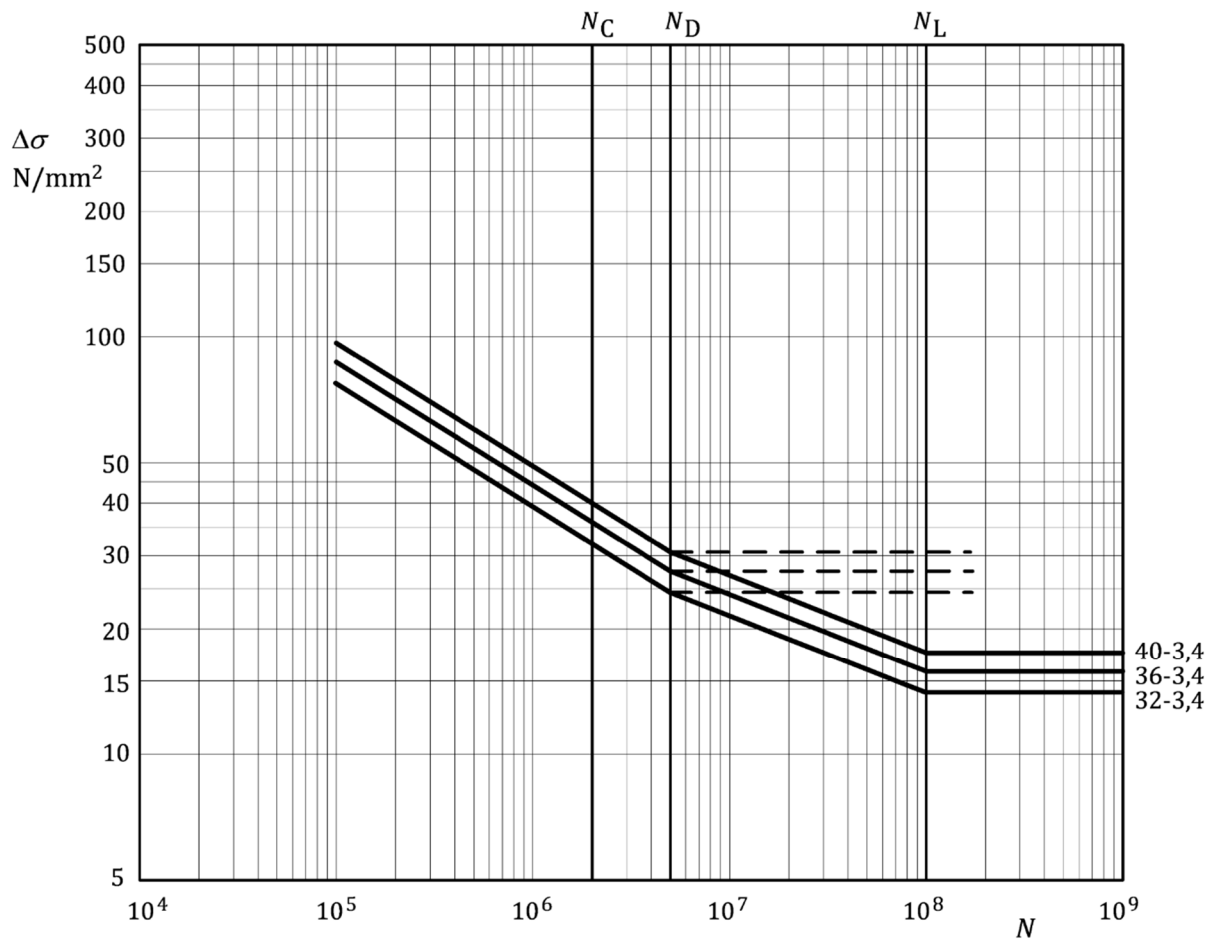
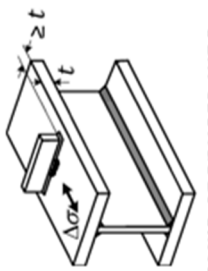
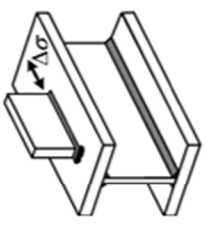


Рисунок J.6 — Криві втомної міцності для перехресних зварних швів на балках складеного перерізу — категорії деталей відповідно до Таблиці J.11

Таблиця J.12 — Числові значення $\Delta\sigma$ (N/mm^2) перехресних зварних швів на балках складеного перерізу — категорії деталей відповідно до Таблиці J.11

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
40-3,4	3,4	5,4	96,5	49,0	40,0	30,6	26,9	17,5	17,5
36-3,4	3,4	5,4	86,9	44,1	36,0	27,5	24,2	15,8	15,8
32-3,4	3,4	5,4	77,2	39,2	32,0	24,4	21,5	14,0	14,0

Таблиця J.13 — Категорії деталей для накладок на балках складеного перерізу

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення		
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Внутрішній	Рівень якості ^b	Додатково
13.1	23–3,4	 Кромка зварного шва	Поперечна накладка, товщина < 20 мм, приварена з одного або двох боків	Переріз «нетто»	Підвищення жорсткості за рахунок накладок / концентрація напружень у "жорсткій точці" з'єднання (порівнювати з Рисунок 7.2)	C	C	Для зварних швів типу "стінка - фланець", див. Таблицю J.5, номер типу. 7.4 або 7.5
13.2	18–3,4	 Кромка зварного шва	Поздовжня накладка довжиною ≥ 100 мм, приварена з усіх боків	Переріз «нетто»		C	C	
13.3	32–4,3	 Кромка зварного шва	Хрестоподібний або Т-подібний, повний провар	Переріз «нетто»		C	C	

Кінець таблиці J.13

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Тип зварного шва	Аналіз напружень		Вимоги щодо виготовлення		
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Внутрішній	Рівень якості	Додатково
13.4	28-4,3	 Кромка зварного шва	Хрестоподібні або Т-подібні, двосторонні зварні шви, тріщина на кромці зварного шва для $a/t > 0,6$	Переріз «нетто»		C	C	
13.5	25-4,3	 Зварний шов	Хрестоподібні або Т-подібні, двосторонні зварні шви, тріщина кореня шва для $a/t \leq 0,6$	Тіло шва «нетто»	Вплив жорсткості кріплення / концентрація напружень у "жорсткій точці" з'єднання (порівнювати з Рисунок 7.2)	C	C	Для зварних швів типу "стінка - фланець", див. Таблицю J.5, номер типу 7.4 або 7.5
13.6	20-4,3	 Кромка зварного шва	Довжина накладки ≥ 100 мм, приварена з усіх боків	Переріз «нетто»		C	C	

^a $m_2 = m_1 + 2$

^b Відповідно до EN ISO 10042:2018.

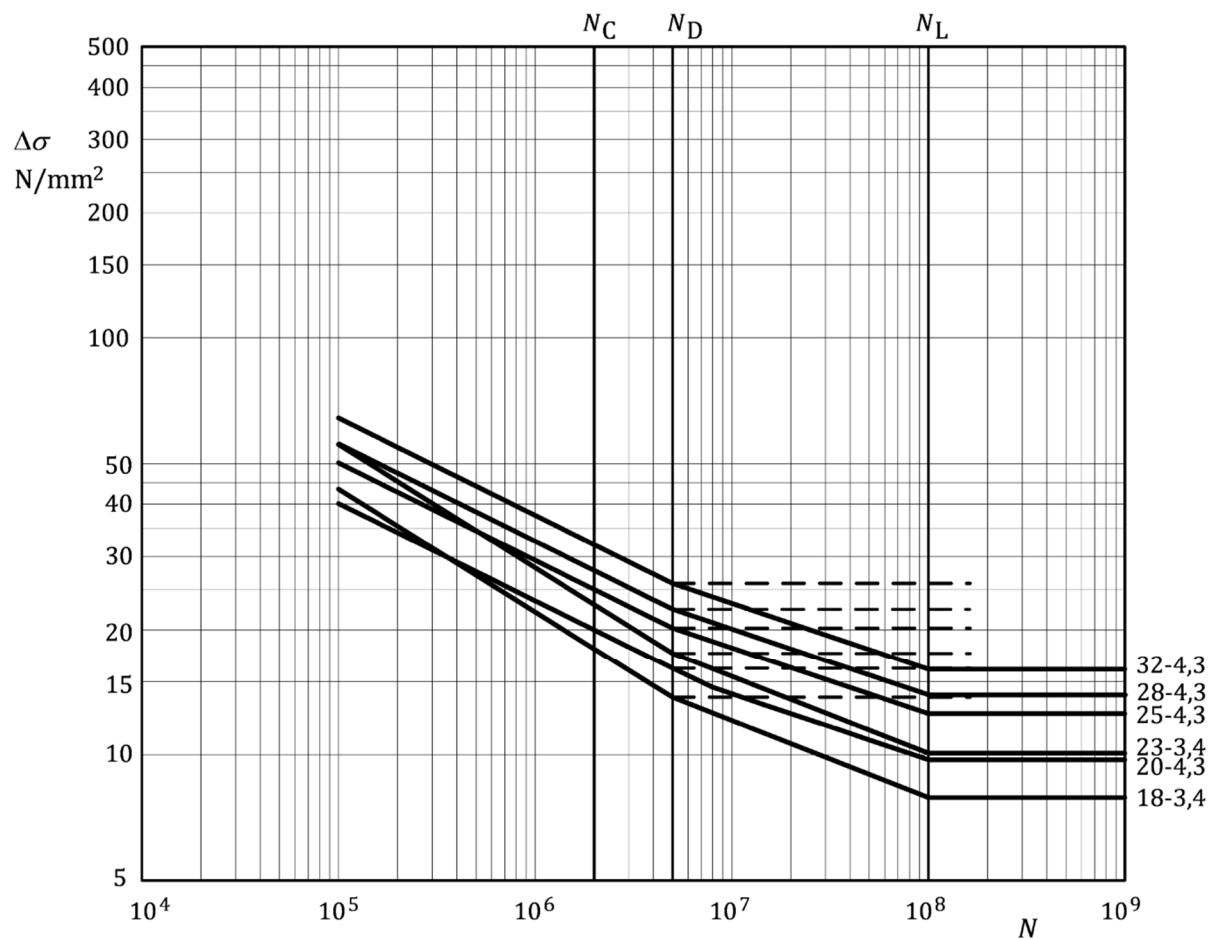
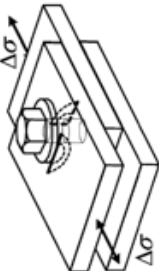
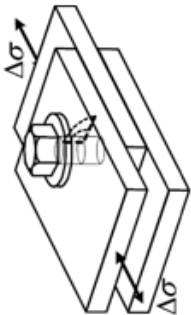


Рисунок J.7 — Криві втомної міцності для кріплень на балках складеного перерізу — категорії деталей відповідно до наблиці J.13

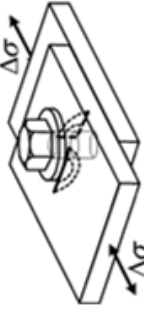
Таблиця J.14 — Числові значення $\Delta\sigma - N$ (Н/мм²) для кріплень на балках складеного перерізу — категорії деталей відповідно до наблиці J.13

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
32-4,3	4,3	6,3	64,2	37,6	32	25,9	23,2	16,1	16,1
28-4,3	4,3	6,3	56,2	32,9	28	22,6	20,3	14,1	14,1
25-4,3	4,3	6,3	50,2	29,4	25	20,2	18,1	12,6	12,6
23-3,4	3,4	5,4	55,5	28,2	23	17,6	15,5	10,1	10,1
20-4,3	4,3	6,3	40,1	23,5	20	16,2	14,5	10,0	10,0
18-3,4	3,4	5,4	43,4	22,1	18	13,7	12,1	7,9	7,9

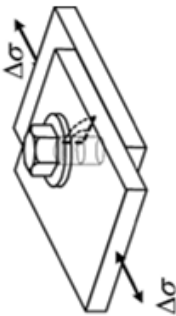
Таблиця J.15 — Категорії деталей для болтових з'єднань^{a, b, c}

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^d$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщин	Аналіз напруження		Вимоги щодо виготовлення
			Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	
15.1	56-4	Симетричне з'єднання із двосторонніми накладками на високоміцних болтах з попереднім натягом (фрикційне з'єднання) 	Номінальне напруження з урахуванням властивостей перерізу «брутто»	Текстура поверхні, геометрія отворів для кріплення; нерівномірний розподіл навантаження між рядами болтів; екцентриситет лінії дії навантаження тільки в симетричних з'єднаннях внапуск з подвійним покриттям.	Плоскі паралельні поверхні тільки Обробка високошвидкісною фрезою; отвори свердли (з додатковим розсвердлюванням) або пробивати (з обов'язковим розсвердлюванням, якщо товщина > 6 мм) Клас болтів з попереднім натягом має бути 8.8 або 10.9, див. EN 1999-1-1.
		Перед отвором (іноді на краю отвору)		Текстура поверхні, геометрія отворів для кріплення; нерівномірний розподіл навантаження між рядами болтів; екцентриситет лінії дії навантаження тільки в симетричних з'єднаннях внапуск з подвійним покриттям.	Плоскі паралельні поверхні тільки Обробка високошвидкісною фрезою; отвори свердли (з додатковим розсвердлюванням) або пробивати (з обов'язковим розсвердлюванням, якщо товщина > 6 мм) Для сталевих болтів, EN 1999-1-1.
15.2	56-4	Симетричне з'єднання із двосторонніми накладками на болтах звичайної міцності  По краю отвору	Номінальне напруження з урахуванням властивостей перерізу «нетто»	Текстура поверхні, геометрія отворів для кріплення; нерівномірний розподіл навантаження між рядами болтів; екцентриситет лінії дії навантаження тільки в симетричних з'єднаннях внапуск з подвійним покриттям.	Плоскі паралельні поверхні тільки Обробка високошвидкісною фрезою; отвори свердли (з додатковим розсвердлюванням) або пробивати (з обов'язковим розсвердлюванням, якщо товщина > 6 мм) Для сталевих болтів, EN 1999-1-1.

Продовження таблиці J.15

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^d$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщини	Аналіз напруження		Вимоги щодо виготовлення
			Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	
15.3	45-4	Односторонні з'єднання на високоміцних болтах з попереднім натягом (фрикційне з'єднання)  Перед отвором (іноді на краю отвору)	Номінальне напруження з урахуванням властивостей перерізу «брутто»	Текстура поверхні, геометрія отворів для кріплення; нерівномірний розподіл навантаження між рядами болтів	Плоскі паралельні поверхні Обробка тільки високошвидкісною фрезою; отвори свердлими (з додатковим розсвердлюванням) або пробивати (з обов'язковим розсвердлюванням, якщо товщина > 6 мм) Поворот з'єднання під навантаженням рекомендовано виключити за допомогою конструктивних засобів Клас болтів з попереднім натягом має бути 8.8 або 10.9, див. EN 1999-1-1

Кінець таблиці J.15

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^d$	Деталі конструкцій Місце виникнення тріщини	Аналіз напруження		Вимоги щодо виготовлення
			Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	
15.4	40-4	Односторонні з'єднання на болтах звичайної міцності  На краю отвору	Номінальне напруження урахуванням властивостей перерізу «нетто»	Текстура поверхні, геометрія отворів для кріплення; нерівномірний розподіл навантаження між рядами болтів	Плоскі паралельні поверхні Обробка тільки високошвидкісною фрезою; отвори свердлити (з додатковим розсвердлюванням) або пробивати (з обов'язковим розсвердлюванням, якщо товщина > 6 мм) Поворот з'єднання під навантаженням рекомендовано виключити за допомогою конструктивних засобів. Вказівки до сталевих болтів див. EN 1999-1-1.
^a Алюмінієві болти не рекомендовано використовувати в конструкціях, що зазнають втомних навантажень. ^b Перевірка міцності сталевих болтів і болтів з нержавіючої сталі (марки A4-70 і A4-80) на розтяг або зсув: див. EN 1993-1-9. ^c З'єднання, стійкі до проковзування, мають використовуватися тільки в тому випадку, якщо межа міцності матеріалу з'єднаних деталей перевищує 200 Н/мм² (див. EN 1999-1-1). ^d $m_1 = m_2$					

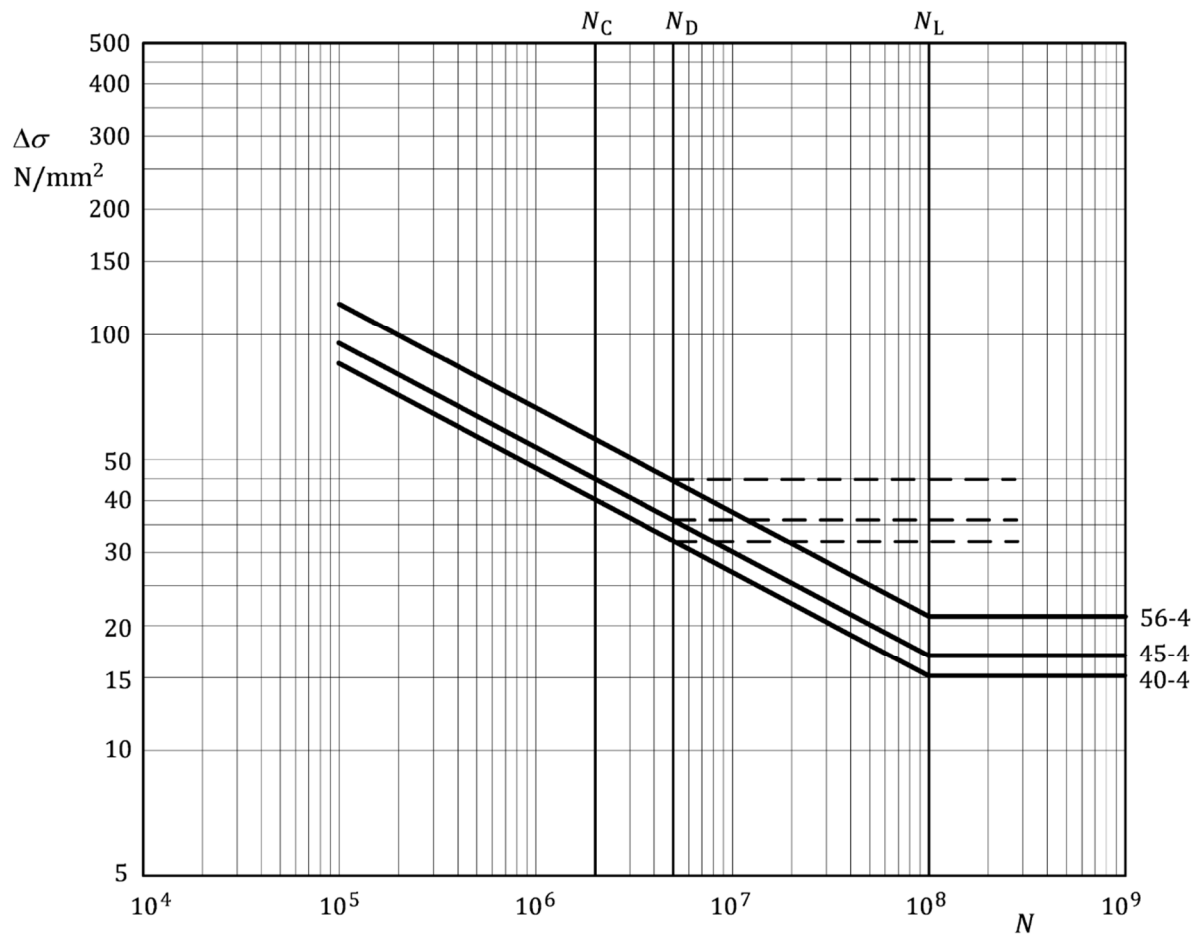
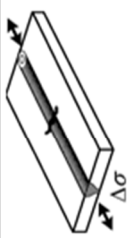
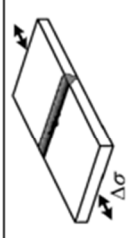


Рисунок J.8 — Криві втомної міцності для болтових з'єднань — категорії деталей відповідно до таблиці J.15

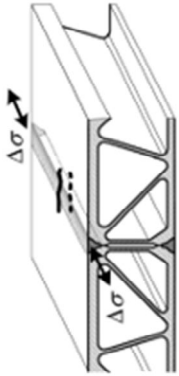
Таблиця J.16 — Числові значення $\Delta\sigma$ (N/mm^2) для болтових з'єднань — категорії деталей відповідно до таблиці J.15

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
56-4	4	4	118	66,6	56	44,5	37,4	21,1	21,1
45-4	4	4	95,2	53,5	45	35,8	30,1	16,9	16,9
40-4	4	4	84,6	47,6	40	31,8	26,7	15,0	15,0

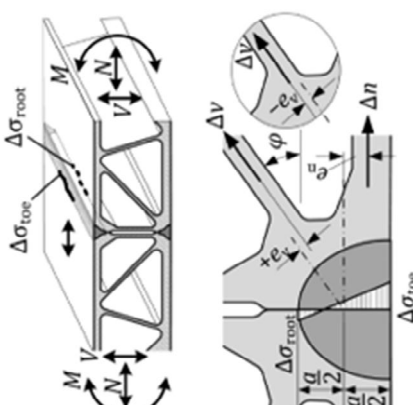
Таблиця J.17 — Категорії деталей для елементів із ротаційним зварюванням тертям

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталь конструкції Місце виникнення тріщин Орієнтація напружень	Тип зварного шва	Аналіз напруження		Вимоги до виготовлення		
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювальних робіт	Внутрішній	Рівень якості b^b Поверхні та геометричні форми
17.1	56-7	 На поверхні шва або підкладці Напруження від поздовжньої осьової сили	Повний провар ЗТП	Номінальне напруження в місці виникнення тріщини	-	Неперервне автоматичне зварювання	-	Як при зварюванні, без старту і зупинки в місці виникнення тріщини
17.2	56-7	 На поверхні шва або підкладці Напруження від поздовжньої осьової сили	Повний провар ЗТП	Номінальне напруження в місці виникнення тріщини	-	Неперервне автоматичне зварювання	-	Як при зварюванні, без старту і зупинки в місці виникнення тріщини

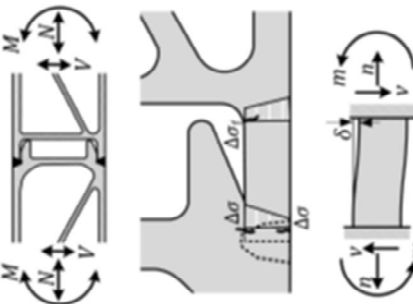
Продовження таблиці J.17

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталь конструкції Місце виникнення тріщин Орієнтація напружень	Тип зварного шва	Аналіз напруження		Вимоги до виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювальних робіт	Рівень якості b	Поверхні та геометричні форми	
17.3	56-7	 У корені або на поверхні зварного шва Напруження від поздовжнього вигину, осьового та/або зсувного зусилля в профілях	Неперевне ЗП, без підкладок	Номинальне напруження з урахуванням всього поперечного перерізу (профілів)	-	Неперевне автоматичне зварювання	-	Як при зварюванні, без старту і зупинки в місці виникнення тріщини	

Продовження таблиці J.17

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталь конструкції Місце виникнення тріщин Орієнтація напружень	Тип зварного шва	Аналіз напруження		Вимоги до виготовлення			Додатково
						Вимоги до зварювальних робіт	Внутрішній	Рівень якості ^b Поверхні та геометричні форми	
17.4	45-4,3 18-3,4	 Кромка зварного шва: $\Delta\sigma_{toe}$ Категорія деталі 45-4,3 Корінь шва: $\Delta\sigma_{root}$ Категорія деталей 18-3,4 Напруження від поперечного згину, осьового та/або зсувного зусилля на профілі	Неперервне ЗТП, без підкладок	Параметр напружень Номінальні напруження ^c $\Delta\sigma_{root}$ і $\Delta\sigma_{toe}$	-	Неперервне автоматичне зварювання	-	Як при зварюванні, без старту і зупинки в місці виникнення тріщини	

Кінець таблиці J.17

Тип деталі	Категорія деталі $\Delta\sigma - m_1^a$	Деталь конструкції Місце виникнення тріщин Орієнтація напружень	Тип зварного шва	Аналіз напруження		Вимоги до виготовлення			Додатково
				Параметр напружень	Концентрація напружень допускається для	Вимоги до зварювальних робіт	Внутрішній	Рівень якості ^b	
17.5	32-4,3	 Корінь або кромка зварного шва: $\Delta\sigma$ Тип деталі 17.5; Увігнутий шов: $\Delta\sigma_f$ Тип деталі 1.6.	Неперервне з'єднання без підкладок.	Номінальне напруження залежно від товщини матеріалу. Напруження від поперечного згину, осьового та/або зсувного зусилля в профілях, де M , N , V і m , n , v — навантаження на одиницю довжини відповідно до рисунка.	-	Неперервне автоматичне зварювання	-	Як при зварюванні, без старту і зупинки в місці виникнення тріщини	-
^a $m_2 = m_1 + 2$ ^b EN ISO 25239-5. ^c $\Delta\sigma_{\text{toe}} = \frac{\Delta n}{a} + \frac{\Delta n \cdot \Delta \eta \cdot \cos(\varphi)}{a^2} + \frac{\Delta \eta \cdot \cos(\varphi)}{a^2} + \frac{\Delta \eta \cdot \cos(\varphi)}{a^2} + \frac{\Delta \eta \cdot \cos(\varphi)}{a^2}$, де Δn і $\Delta \eta$ — навантаження на одиницю довжини згідно з рисунком.									

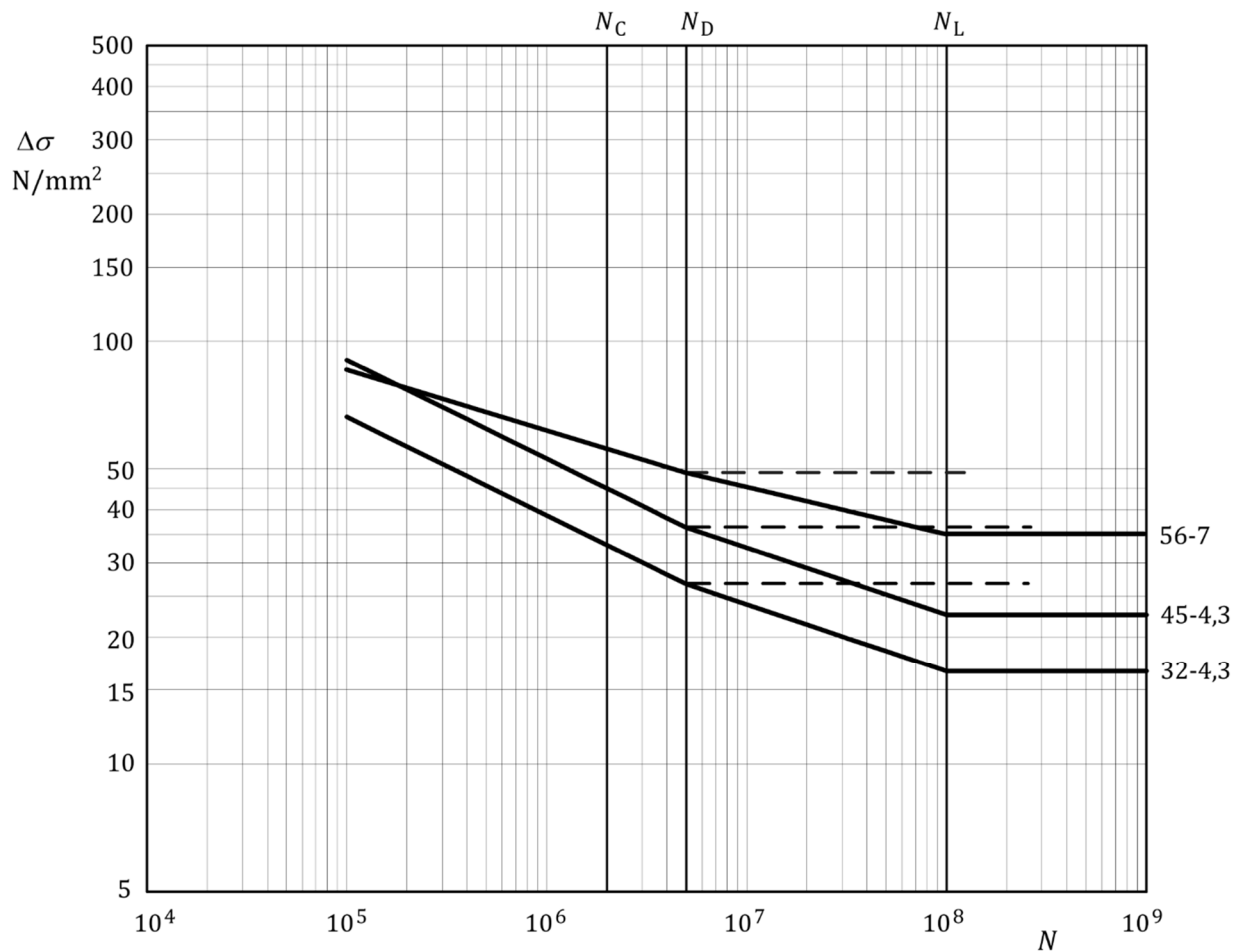


Рисунок J.9 — Криві втомної міцності для елементів із ротаційним зварюванням тертям — категорії деталей відповідно до Таблиці J.17

Таблиця J.18 — Числові значення $\Delta\sigma$ (N/mm^2) для елементів із ротаційним зварюванням тертям — категорії деталей відповідно до таблиці J.17

Категорія деталі	Нахил		Кількість циклів N						
	m_1	m_2	1×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	1×10^8	1×10^9
56–7	7	9	85,9	61,8	56	49,1	45,5	35,2	35,2
45–4,3	4,3	6,3	90,3	52,9	45	36,4	32,6	22,6	22,6
32–4,3	4,3	6,3	64,2	37,6	32	25,9	23,2	16,1	16,1
18–3,4	3,4	5,4	43,4	22,1	18	13,7	12,1	7,9	7,9

ДОДАТОК К

(довідковий)

МЕТОД БАЗОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МАКСИМУМІВ НАПРУЖЕНЬ

К.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток містить додаткові вказівки до 7.2.4, 8.2.4 щодо методу базових локальних максимумів напружень.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього довідкового додатка наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатка, його можна використовувати.

К.2 Сфера та область застосування

(1) Цей довідковий додаток містить вказівки щодо використання методу базових локальних максимумів напружень, який можна використати у поєднанні з додатком J для визначення базових локальних максимумів напружень.

К.3 Метод базових локальних максимумів напружень

(1) Для методу базових локальних максимумів напружень, як визначено в цьому додатку, рекомендовано використовувати дані, визначені згідно з вимогами цього стандарту.

(2) Порядок розрахунку виглядає наступним чином:

а) вибрати базову деталь з відомою втомною міцністю з таблиць категорій деталей, яка максимально схожа на оцінювану деталь за якістю зварного шва, геометричними параметрами та характеристиками навантаження;

б) визначити тип напруження, в якому виражена втомна міцність. Зазвичай це номінальне напруження (як у таблицях категорій деталей);

с) створити скінчено-елементну модель базової деталі та оцінюваної деталі з типом сітки та елементами відповідно до рекомендацій 7.1;

д) прикласти в якості навантаження на базову деталь і оцінювану деталь систему напружень, визначену в пункті b);

е) визначити діапазони напружень у «гарячих точках» $\Delta\sigma_{HS,ref}$ базової деталі та діапазони напружень у «гарячих точках» $\Delta\sigma_{HS,assess}$ оцінюваної деталі;

ф) втомну міцність для 2×10^6 циклів оцінюваної деталі $\Delta\sigma_{C,assess}$, потім розраховують на основі класу втоми базової деталі $\Delta\sigma_{C,ref}$ як зазначено у формулі (К.1):

$$\Delta\sigma_{C,assess} = \frac{\Delta\sigma_{HS,assess}}{\Delta\sigma_{HS,ref}} \Delta\sigma_{C,ref} \quad (K.1)$$

г) припустити, що оцінювана деталь має такі ж ухили m_1 , m_2 , як і базова деталь.

(3) У разі проведення контрольних вимірювань для перевірки розрахункових напружень рекомендовано забезпечити правильне розташування тензорезисторів поза зоною теплового впливу.

ДОДАТОК L

(довідковий)

ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ, ВИБОРУ ЧАСТКОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ, ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПОШКОДЖЕНЬ, ІНТЕРВАЛІВ МІЖ ПЕРЕВІРКАМИ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ЯКЩО ПРИЙНЯТО ДОДАТОК J

L.1 Застосування цього довідкового додатку

(1) Цей довідковий додаток надає додаткові вказівки до наведених у 4.2.2, A.5.3 щодо методів проєктування, вибору часткових коефіцієнтів, граничних значень пошкоджень, інтервалів між перевірками та параметрів виготовлення, якщо прийнято додаток J.

Примітка. Національний вибір щодо застосування цього інформаційного додатка наведено в національному додатку. Якщо національний додаток не містить інформації щодо застосування цього довідкового додатка, його можна використовувати.

L.2 Сфера та область застосування

(1) Цей довідковий додаток містить вказівки щодо використання методів розрахунку, вибору часткових коефіцієнтів, граничних значень пошкоджень, інтервалів перевірок та параметрів виготовлення, якщо прийнято додаток J.

L.3 Методологія методу безпечного ресурсу

L.3.1 Загальні положення

(1) Ці рекомендації можуть бути застосовані лише тоді, коли прийнято дані щодо втомної міцності, наведені в додатку J.

(2) Підхід до проєктування методом безпечного ресурсу рекомендовано застосовувати там, де немає можливостей для перевірки на втому або де перевірку на втому з інших причин не

передбачено.

Примітка. SLD може бути найбільш економічно ефективним рішенням, якщо вартість ремонту оцінено як відносно високу.

(3) Якщо всі діапазони розрахункових напружень розташовано нижче розрахункової межі витривалості з постійною амплітудою, має бути виконано умову, наведену у формулі (L.1):

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma}{\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}} \leq 1 \quad (L.1)$$

Примітка. Для γ_{Mf} див. L.6. Для γ_{Ff} див. 4.4.

(4) Спектри діапазонів напружень дозволено змінювати шляхом нехтування розрахунковими піковими значеннями діапазонів напружень, внесок яких у величину пошкодження ($D_{L,d}$) менше ніж 0,01.

(5) Дозволено застосовувати один з двох типів методу безпечного ресурсу: SLD-I та SLD-II, див. L.3.2 та L.3.3.

L.3.2 SLD-I

(1) При використанні SLD-I не рекомендовано проводити програму регулярних перевірок.

Примітка. Регулярна перевірка охоплює як загальний огляд, так і перевірку на втому. Пояснення термінів наведено в таблиці L.2.

L.3.3 SLD-II

(1) Під час використання SLD-II потрібно/рекомендовано виконувати програму загальної перевірки, яку рекомендовано готувати відповідно до L.5.

Примітка. Оскільки належне виконання програми перевірок під час технічного обслуговування є передумовою проектування, важливо, щоб власник(и) споруди забезпечував(ли) дотримання програми перевірок протягом усього строку

L.4 Методологія методу допустимої пошкоджуваності

L.4.1 Загальні положення

(1) Ці настанови можуть бути застосовані лише тоді, коли прийнято дані щодо втомної міцності, наведені в Додатку J.

(2) Дозволено застосовувати один з двох типів методу допустимої пошкоджуваності: DTD-I та DTD-II, див. L.4.2 та L.4.3.

L.4.2 DTD-I

(1) DTD-I базується на тому, що будь-яку тріщину, виявлену під час перевірки, усувають або компонент замінюють

(2) При використанні DTD-I програма регулярних перевірок має бути підготована відповідно до L.5.

Примітка. Оскільки належне виконання програми перевірок під час технічного обслуговування є передумовою проєктування, власнику (власникам) важливо забезпечити дотримання програми перевірок протягом усього строку експлуатації споруди.

(3) Рекомендовано використовувати один з наступних варіантів DTD-I:

а) для варіанту DTD-IA рекомендовано, щоб конструкція мала достатню стійкість, тобто була статично невизначеною, щоб перерозподілити зусилля від діючих навантажень таким чином, щоб будь-яке початкове поширення тріщини зупинилося, а конструкція залишалася здатною витримувати перерозподілений спектр зусиль від діючого навантаження;

б) для варіанту DTD-IB рекомендовано, щоб конструкція мала достатньо великі перерізи, щоб витримати діючі навантаження після появи перших тріщин, помітних неозброєним оком. Такі тріщини не мають призводити до руйнування конструкції. Має бути

продемонстрована залишкова здатність витримувати квазістатичні розрахункові навантаження після появи тріщин. Рекомендовано вимагати, щоб у разі виявлення тріщин конструкція була відремонтована або ріст тріщин був зупинений ефективними засобами.

(4) Підхід типу DTD-I дозволено засновувати на одному з двох методів забезпечення достатнього опору елементу або конструкції, на основі якого його застосовано:

- а) розрахунок лінійного накопичення пошкоджень, див. (5);
- б) еквівалентний діапазон напружень, див. (6).

(5) У DTD-I розрахункове значення пошкодження D_L для всіх циклів на основі лінійного накопичення пошкоджень має відповідати умові формули (L.2):

$$D_{L,d} \leq 1 \quad (L.2)$$

або формули (L.3):

$$D_{L,d} \leq D_{lim} \quad (L.3)$$

де $D_{L,d} = \sum n_i / N_i$ обчислюють за алгоритмом, наведеним у пункті А.4;

$D_L = \sum n_i / N_i$ обчислюють за алгоритмом, наведеним у пункті А.4, але з $\gamma_{Mf} = \gamma_{Ff} = 1,0$.

Примітка. Значення D_{lim} наведено в L.6, якщо тільки в національному додатку не вказані інші значення.

(6) Якщо при проектуванні використовують метод еквівалентного діапазону напружень ($\Delta\sigma_{E,2e}$), має виконуватись умова (L.4):

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2e}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} < 1 \quad (L.4)$$

L.4.3 DTD-II

(1) DTD-II допускає появу в конструкції втомних тріщин за умови, що ріст тріщини відстежують і контролюють за допомогою програми контролю втоми, заснованої на механіці руйнування.

Примітка. Програми перевірок див. у розділі L.5.

(2) Рекомендовано визначити мінімальний розмір тріщини, який можна виявити в місцях потенційного зародження тріщин.

(3) Конструкції потрібно мати достатньо великі перерізи, щоб витримувати розрахункове навантаження після появи перших тріщин, які можна виявити неозброєним оком.

(4) Рекомендовано розрахувати історію напружень в місцях появи тріщин з подальшим підрахунком діапазонів інтенсивності напружень та побудовою спектрів інтенсивності напружень.

(5) На основі (2) і (4), залежність розвитку тріщини для сплаву рекомендовано використовувати для розрахунку швидкості розвитку тріщини за допомогою підходу механіки руйнування. Використовуючи цей підхід, рекомендовано оцінити час, необхідний для того, щоб мінімальний розмір тріщини, який можна виявити, збільшився до максимального безпечного розміру тріщини, і врахувати його в специфікаціях відповідної програми контролю втоми.

Примітка. Вказівки щодо даних про розвиток тріщин наведено в додатку В.

(6) Рекомендовано продемонструвати залишкову несну здатність при квазістатичних розрахункових навантаженнях після розтріскування.

(7) На основі параграфу (6) рекомендовано розробити програму регулярних обстежень і моніторингу розвитку будь-яких тріщин. Рекомендовано визначити час початку перевірок та найдовші інтервали між ними, див. L.5.

Примітка. Застосовна остання примітка в L.3(2).

(8) D_L для DTD-II має задовольняти формулі (L.5):

$$D_{L,d} \leq D_{lim} \quad (L.5)$$

де D_{lim} є більшим за 1,0, але має бути обмеженим, див. L.6.

L.5 Початок та інтервали перевірки

(1) Ці настанови можуть бути застосовані лише тоді, коли прийнято дані щодо втомної міцності, наведені в додатку J.

(2) У програмах перевірки мають бути вказані час початку перевірки після зведення та інтервали між перевірками.

Примітка. Початок перевірки та інтервали між перевірками наведено в таблиці L.1 (NDP), якщо тільки в національному додатку не вказано інші значення.

Таблиця L.1 (NDP) — Рекомендований початок перевірки та максимальні інтервали між перевірками

Методологія проектування	Порядок проектування	Тип методології проектування	Рекомендований початок обстеження ^a	Рекомендовані максимальні інтервали між обстеженнями
Метод безпечного ресурсу SLD	Накопичення пошкоджень	SLD -I	-	-
		SLD -II	$T_G = 0$	$\Delta T_G = 6$ років
	Межа втоми при постійній амплітуді ($\Delta \sigma_{E,d} < \Delta \sigma_{D,d}$)	SLD -I	-	-
		SLD -II	$T_G = 0$	$\Delta T_G = 6$ років
Метод допустимої пошкоджуваності DTD	Накопичення пошкоджень	DTD -IA	$T_G = 0$	$\Delta T_G = 6$ років
			$T_F = 0,5T_S$	$\Delta T_F = 0,25T_S$
		DTD -IB	$T_G = 0$	$\Delta T_G = 6$ років
			$T_F = 0,5T_S$	$\Delta T_F = 0,25T_S$

	Накопичення пошкодження та механіка руйнування	DTD -II	$T_G = 0$ $T_F = 0,8T_S$	$\Delta T_G = 6$ років ΔT_F визначено механікою руйнування
--	---	---------	-----------------------------	--

Кінець таблиці L.1

^a T_G — рекомендований час після завершення будівництва до початку загального огляду. Загальний огляд включає в себе перевірку незмінності та цілісності конструкцій на момент введення в експлуатацію, виявлення дефектів, таких як пошкодження, викликані появою додаткових отворів або зварних швів для нових елементів, пошкодження внаслідок вандалізму або нещасних випадків, непередбачена корозія тощо. ΔT_G — рекомендований максимальний інтервал часу для загального огляду. T_F — рекомендований час після завершення монтажу до початку перевірки на втому. Перевірка на втому включає в себе перевірку ділянок з високою ймовірністю появи тріщин. ΔT_F — рекомендований максимальний інтервал часу для перевірки на втому.
--

(3) Для DTD-I значення T_S , яке використовують для визначення T_F і ΔT_F , рекомендовано розраховувати відповідно до А.4.3(1). Якщо не зазначено інше, інтервал часу між перевітками не має перевищувати $T_S/4$.

(4) Для DTD-II значення T_S , яке використовують для визначення T_F , рекомендовано розраховувати згідно з А.4.3(1). ΔT_F рекомендовано визначати з використанням механіки руйнування.

L.6 Часткові коефіцієнти γ_{Mf} та значення D_{lim}

(1) Ці настанови можуть бути застосовані тільки тоді, коли прийнято дані про опір, наведені в Додатку J.

(2) Оцінка втоми має ґрунтуватися або на розрахунковому

значенні втомної міцності, отриманому з використанням часткового коефіцієнта запасу міцності γ_{Mf} для характеристичної втомної міцності $\Delta\sigma_{if}$, або на визначенні граничного значення D_{lim} для розрахункового значення пошкодження D_L , зважаючи на клас наслідків і використаний метод проєктування.

(3) Концепція безпеки має ґрунтуватися на застосуванні γ_{Ff} , γ_{Mf} і D_{lim} , а також на вимогах до програм інспекцій, наведених у L.5.

Примітка 1. Значення γ_{Mf} , які базуються на значенні γ_{Ff} , що дорівнює 1,0, наведено в таблиці L.2 (NDP), якщо тільки в національному додатку не вказано інші значення.

Примітка 2. Ступінь використання замість класу наслідків як критерій для вибору значення γ_{Mf} в таблиці L.2 (NDP) може бути визначений у національному додатку.

Таблиця L.2 (NDP) — Рекомендовані значення γ_{Mf} — значення відносно класу наслідків

Методологія проєктування	Порядок проєктування	Клас наслідків (відповідальності)		
		CC1	CC2	CC3
		$\gamma_{Mf}^{a b c d}$	$\gamma_{Mf}^{a b c d}$	$\gamma_{Mf}^{a b c d}$
SLD-I	Накопичення пошкоджень	1,1	1,2	1,3
	Постійна амплітудна втома ($\max \Delta\sigma_{E,d} < \Delta\sigma_{D,d}$)	1,1	1,2	1,3
SLD-II	Накопичення пошкоджень	1,0	1,1	1,2
	Постійна амплітудна втома ($\max \Delta\sigma_{E,d} < \Delta\sigma_{D,d}$)	1,0	1,1	1,2
DTD-I	Накопичення пошкоджень	1,0	1,0	1,1
DTD-II	Накопичення пошкоджень	1,0	1,0	1,1

- ^a Значення таблиці дозволено зменшувати відповідно до приміток від *a* до *d* нижче, за умови, що значення γ_{Mf} не стає меншим за 1,0.
- ^b Наведені вище табличні значення γ_{Mf} дозволено зменшувати на 0,1, якщо виконано одну з наступних умов:
- ділянки зварних елементів, на яких відсутні зварні шви;
 - категорії деталей, де $\Delta\sigma_C < 25 \text{ Н/мм}^2$;
 - зварні елементи з незмінним у часі діапазоном максимальних напружень;

Кінець таблиці L.2

- проведено додатковий неруйнівний контроль (НК) мінімум для 50%.
Для клейових з'єднань див. Е.2(6).
- ^c Наведені вище значення γ_{Mf} можна зменшити на 0,2, якщо виконано одну з наступних умов:
- ділянки зварних елементів, на яких відсутні зварні шви, та незмінний у часі діапазон максимальних напружень;
 - категорії деталей, де $\Delta\sigma_C < 25 \text{ Н/мм}^2$ і незмінний у часі діапазон максимальних напружень;
 - вузли та конструкції виконані без зварювання;
 - проведено додатковий НК мінімум для 50% і незмінний у часі діапазон максимальних напружень;
 - якщо проведено додатковий НК у розмірі 100%.
- ^d Наведені вище значення γ_{Mf} можна зменшити на 0,3, якщо виконано одну з наступних умов:
- вузли та конструкції виконані без зварювання і незмінний у часі діапазон максимальних напружень;
 - додатковий НК на 100% і незмінний у часі діапазон максимальних напружень.

(4) Рекомендовано вказати значення елемента безпеки D_{lim} .

Примітка. Національний додаток може встановлювати значення для D_{lim} в межах діапазону, визначеного формулою (L.6):

$$\left(\frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}} \right)^{m_2} \leq D_{lim} \leq \left(\frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}} \right)^{m_1} \quad (L.6)$$

(5) Для DTD-II значення D_{lim} є більшим за 1, але має бути обмеженим.

Примітка. Значення для D_{lim} становлять 2,0 для зварних, болтових або клепанних деталей і 4,0 для гладких деталей, якщо тільки в національному додатку не вказані інші значення.

L.7 Параметри виконання

L.7.1 Категорія обслуговування

(1) Якщо прийняті дані втомної міцності, наведені в Додатку J, то для віднесення елементів до категорії експлуатації ЕК1 рекомендовано використовувати критерії а), b) або с), наведені нижче:

а) якщо найбільший діапазон номінальних напружень $\Delta\sigma_{E,k}$ задовольняє формулам (L.7) і (L.8):

для основного матеріалу, включаючи зону теплового впливу (ЗТВ) і стикові зварні шви

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,k} \leq \frac{13,7}{\gamma_{Mf}} \frac{H}{\text{мм}^2} \quad (L.7)$$

для кутових зварних швів

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,k} \leq \frac{9,2}{\gamma_{Mf}} \frac{H}{\text{мм}^2} \quad (L.8)$$

де для значення γ_{Mf} згідно SLD-I рекомендовано використовувати:

$\Delta\sigma_{E,k}$ — характеристичне значення напруження від діючого навантаження (діапазон напружень).

b) для випадків спектрів втомлювального навантаження ($\Delta\sigma_{E,k,i}$), якщо L.7.2 використано для розрахунку ступеня втомного використання U , і U не перевищує значення 1,0, на якому базується

втомна міцність:

- для основного матеріалу (включаючи ЗТВ і стикові зварні шви), категорія деталей 18-3,4;

- для зварних швів внапуск, категорія деталей 12-3,4.

Рекомендовано використовувати значення γ_{Mf} для SLD-I. Для випадків, коли найбільша амплітуда напружень припадає на всі цикли, значення можна зменшити на 0,1.

с) для випадків, коли граничні значення за критеріями а) або б) перевищені, і якщо ступінь втомного використання U згідно з L.7.2 не перевищує значення 0,5, і коли втомна міцність базується на найнижчих значеннях для наступних випадків:

- для основного матеріалу (без впливу зварювання), категорія деталей 71-7;

- для суцільних повздовжніх швів (напрямок напружень паралельний осі шва), категорія деталей 40-4,3;

- для стикових зварних швів, категорія деталей 36-3,4.

Рекомендовано використовувати значення γ_{Mf} для SLD-I. Для випадків, коли найбільша амплітуда напружень припадає на всі цикли, значення дозволено зменшити на 0,1, але водночас отримане значення γ_{Mf} має бути не менше 1,0.

Примітка. Інші або додаткові критерії для визначення категорії обслуговування може бути наведено в національному додатку .

L.7.2 Визначення ступеня використання

(1) У цьому пункті наведено положення щодо розрахунку ступеня використання U для компонентів, схильних до втоми, якщо для проєктування були використані дані щодо втомної міцності згідно з Додатком J, а для визначення вимог до якості та контролю були обрані EN 1090-3:2019, Додатки K і L. Розраховані значення застосовні для визначення двох експлуатаційних категорій ЕК1 і ЕК2.

Примітка 1. Категорія експлуатації визначена в EN 1090-3:2019 як «Категорія, що характеризує елемент або конструкцію з точки зору обставин її використання». Категорія експлуатації 1 (ЕК1) стосується переважно статичного навантаження або сейсмічної пластичності СП1. Категорія експлуатації 2 (ЕК2) стосується втоми або сейсмічної пластичності СП2. Див. EN 1999-1-1:2023, Додаток А.

Примітка 2. EN 1090-3 містить критерії для визначення обсягу контролю та вимоги до рівня якості для двох категорій обслуговування, а також кількісні критерії для контролю зварних швів залежно від класу виготовлення та ступеня використання.

(2) Ступінь використання за втомою для постійного діапазону напружень для обмеженої кількості циклів n рекомендовано розраховувати за формулою (L.9):

$$U = \frac{\Delta\sigma_{E,k} \cdot \gamma_{Ff}}{\Delta\sigma_{R,k} / \gamma_M} \quad (L.9)$$

де $\Delta\sigma_{E,k}$ — діапазон характеристичних напружень (для комбінованих напружень — головне напруження) у розгляданому перерізі для заданої кількості циклів n ;

$\Delta\sigma_{R,k}$ — відповідне значення діапазону міцності відповідної кривої втомної міцності для заданої кількості циклів n .

(3) Для випадку втоми з усіма діапазонами напружень, меншими за $\Delta\sigma_D$, і необмеженою кількістю циклів, ступінь використання рекомендовано розраховувати за формулою (L.10):

$$U = \frac{\Delta\sigma_{E,k} \cdot \gamma_{Ff}}{\Delta\sigma_D / \gamma_M} \quad (L.10)$$

де $\Delta\sigma_{E,k}$ — найбільший діапазон напружень;

$\Delta\sigma_D$ — межа постійної амплітудної втоми.

(4) Якщо розрахунок базується на еквівалентному діапазоні напружень постійної амплітуди $\Delta\sigma_{E,2e}$, ступінь використання рекомендовано розраховувати за формулою (L.11):

$$U = \frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2e}}{\Delta \sigma_C / \gamma_M} \quad (L.11)$$

де $\Delta \sigma_C$ — втомна міцність для 2×10^6 циклів.

(5) Якщо ступінь використання U ґрунтується на розрахунку значень втомних пошкоджень відповідно до лінійного накопичення пошкоджень, його значення для потреб цього додатка може бути розраховане за формулою (L.12):

$$U = \sqrt[m_1]{D_{L,d}} \quad (L.12)$$

де $D_{L,d}$ — розраховано відповідно до 4.3.1 та 8.2.1.

БІБЛІОГРАФІЯ

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

Посилання на нижчеперелічені документи наведено в тексті так, що частина або весь їх зміст є настійно рекомендованим вибором або напрямом дій в рамках даного стандарту. Застосування альтернативних стандартів дозволено за умови технічного обґрунтування відповідно до національного законодавства та/або будь-яких відповідних договірних положень. У разі датованих посилань застосовують лише наведені видання. У разі недатованих посилань з потрібно користуватись останнім виданням нормативних документів (разом зі змінами).

1. EN 1991 (all parts), Eurocode 1: Actions on structures (All parts)

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

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

Посилання, що містяться в дозволах (тобто через пункти «дозволено», «можна»)

Наведені нижче документи згадано в тексті так, що їх зміст частково або повністю виражає спосіб дій, дозволений в межах Єврокодів. У разі датованих посилань застосовують тільки цитоване видання. У разі недатованих посилань потрібно користуватись останнім виданням нормативних документів (разом зі змінами).

2. EN 1999-1-4:2023 Eurocode 9 — Design of aluminium structures — Part 1-4: Cold-formed structural sheeting

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

2. EN 1999-1-4 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих

Посилання, що містяться у можливих варіантах (тобто через пункт «має можливість»)

Перелічені нижче документи наведено в стандарті довідково, наприклад, у реченнях зі словом «має можливість» та в примітках.

3. EN ISO 4287 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287)

4. EN ISO 4288 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture (ISO 4288)

5. EN ISO 10042:2018 Welding — Arc-welded joints in aluminium and its alloys — Quality levels for imperfections (ISO 10042:2018)

6. EN ISO 25239-5 Friction stir welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements (ISO 25239-5:2020)

7. EN 1993-1-9 Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-9: Fatigue

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

3. ISO 4287 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури

4. ISO 4288 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінення структури

5. EN ISO 10042 Зварювання. З'єднання з алюмінію та його сплавів, виконані дуговим зварюванням. Рівні якості залежно від дефектів

6. EN 1993-1-9 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-9. Витривалість (EN 1993-1-9:2005, IDT)

ДОДАТОК НА
(довідковий)
ПЕРЕЛІК НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ УКРАЇНИ, ІДЕНТИЧНИХ
ЄВРОПЕЙСЬКИМ ТА МІЖНАРОДНИМ НОРМАТИВНИМ
ДОКУМЕНТАМ, ПОСИЛАННЯ НА ЯКІ Є В ЦЬОМУ СТАНДАРТІ

ДСТУ EN 1090-3:2022 (EN 1090-3:2019, IDT) Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 3. Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій

ДСТУ-Н Б EN 1990 Єврокод. Основи проектування конструкцій

ДСТУ EN 1999-1-1:202__ (EN 1999-1-1:2023, IDT) «Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила»

Ключові слова: безпека, довговічність, граничні стани, матеріали, міцність вузлів, несна здатність, вузли, алюмінієві конструкції, стійкість.

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

О. В. Шимановський

Заступник генерального директора з
науково-технічної політики,
заступник голови ТК 301
(науковий керівник розробки)

В. П. Адріанов

Завідувач відділу

О. І. Кордун

Завідувач групи

Я. В. Лимар

Провідний редактор-перекладач

В. П. Гаврилова