

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова



**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ СУДНОВОЇ БАЛКИ-СТІНКИ ПРИ
СТАТИЧНОМУ ПРУЖНОМУ ТА ЦИКЛІЧНОМУ ПРУЖНО-
ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ**

УКФА 360232.007М

Зав. сектором С і М

Уразманов Ф.Х.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР

доктор техн. наук, проф.

_____ Павлов Г.В.

«___» _____ 2021 р.

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ СУДНОВОЇ БАЛКИ-СТІНКИ ПРИ
СТАТИЧНОМУ ПРУЖНОМУ ТА ЦИКЛІЧНОМУ ПРУЖНО-
ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ**

УКФА 360232.007М

Зав. сектором С і М

Уразманов Ф.Х.

1 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ БАЛКИ-СТІНКИ ПРИ ПРУЖНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

1.1 Загальні положення

Об'єктом розрахунку є балка-стінка (рис. 1.1), яка нижньою прямолінійною кромкою 2 приєднана до обшивки I , а верхня ламана кромка є вільною.

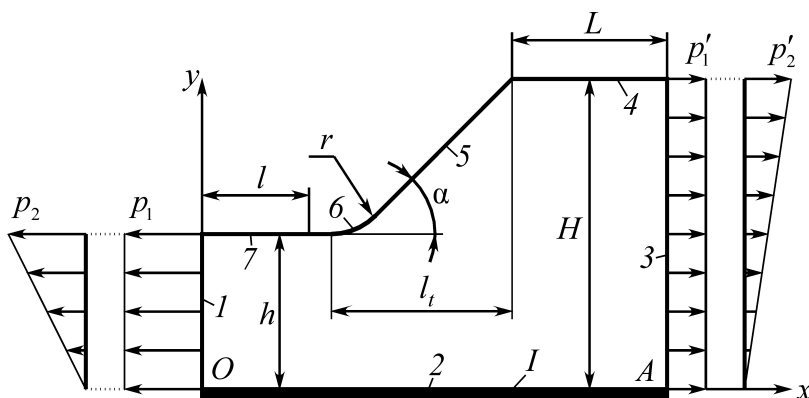


Рис. 1.1. Загальний вигляд балки-стінки: I – обшивка

Балки на рис. 1.1 зазнають осьових навантажень p_1 , спричинених загальним згином корпусу судна і згинальних навантажень p_2 , від місцевого згину перекриття.

Наразі не існує систематичних методик для оцінки міцності цих балок, і відповідно рекомендацій щодо їх проектування, і для оцінки їх міцності доводиться кожен раз використовувати програмні комплекси. Це призводить до збільшення трудомісткості проектування суднокорпусних конструкцій в цілому на початкових етапах. Балки такого типу можуть працювати як в умовах пружного, так і в умовах пружно-пластичного деформування.

1.2 Методика проектувального розрахунку

Вважається, що заданими величинами балки-стінки є відношення H/h і коефіцієнт концентрації k_1 для розтягу-стиску або коефіцієнт k_2 для згину осередкової зони 6. Величинами, що варіюються є α та r/h (рис. 1.1), оптимальні значення яких можуть забезпечити мінімум собівартості виготовлення (мінімум

затрат матеріалу, часу та відходів при виробництві). Нижче на рис. 1.2, 1.3 представлені графіки залежностей оптимальних α і r/h від k_1 і k_2 для різних H/h .

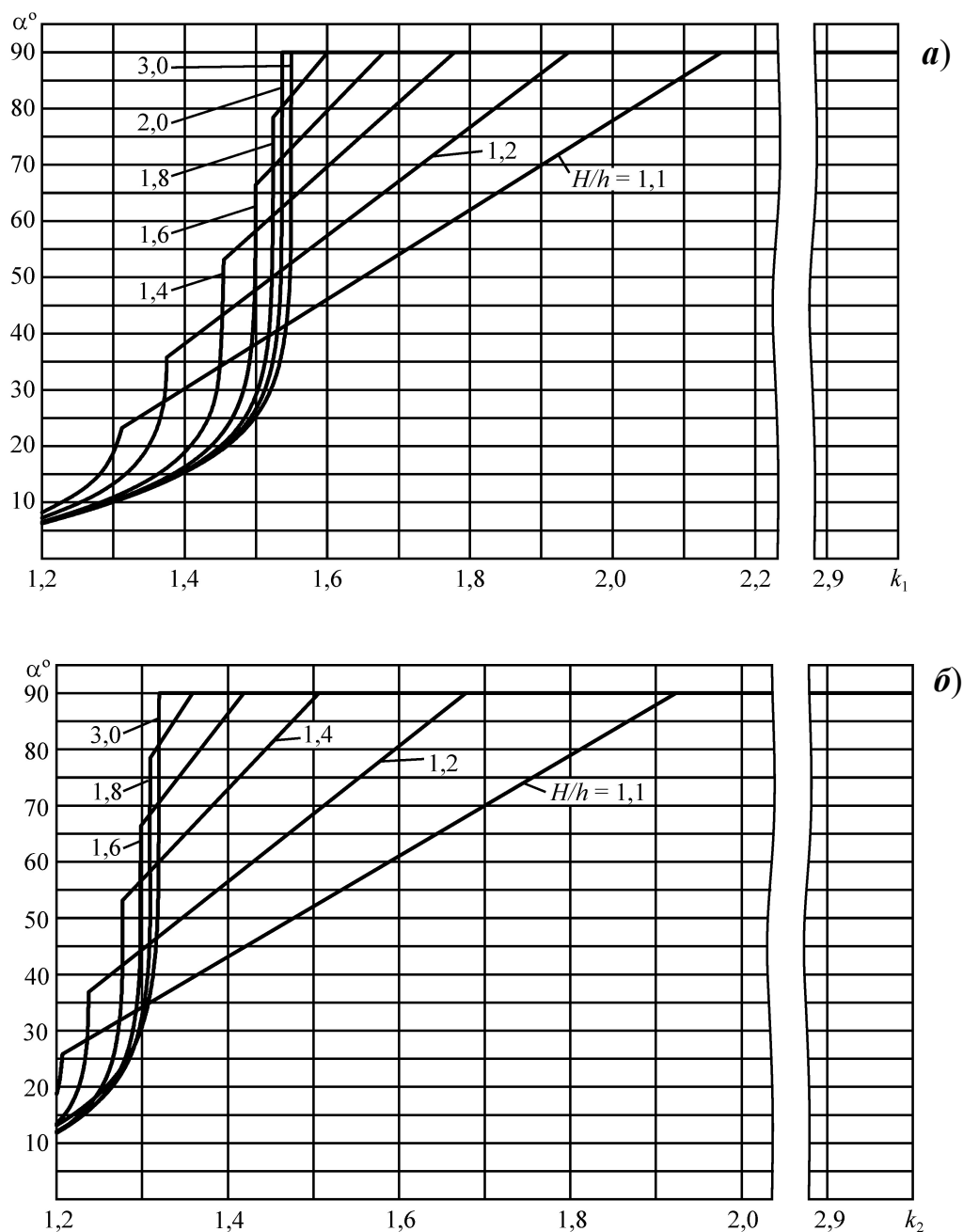


Рис. 1.2. Графіки залежностей оптимальних α від коефіцієнтів концентрації при різних H/h : а – для коефіцієнту концентрації k_1 при розтягу-стиску; б – для коефіцієнту концентрації k_2 при згині.

Приведені на рис. 1.2 залежності мають наступні особливості. При значеннях H/h від 1,1 до 1,8 на початок нахилених прямих ліній, котрі з'являються при

зростаючому аргументі k_1 або k_2 , приходить момент зникнення похилої прямолінійної кромки 5 (рис. 1.1). Аналітично це можна записати так:

$$\left. \begin{array}{l} \text{якщо } H - h > r(1 - \cos \alpha) \rightarrow \text{кромка 5 існує} \\ \text{якщо } H - h \leq r(1 - \cos \alpha) \rightarrow \text{кромки 5 немає.} \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

Якщо прямолінійної кромки 5 немає, то кут α визначається наступним чином

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{H - h}{r}\right), \quad \alpha, \text{rad.} \quad (1.2)$$

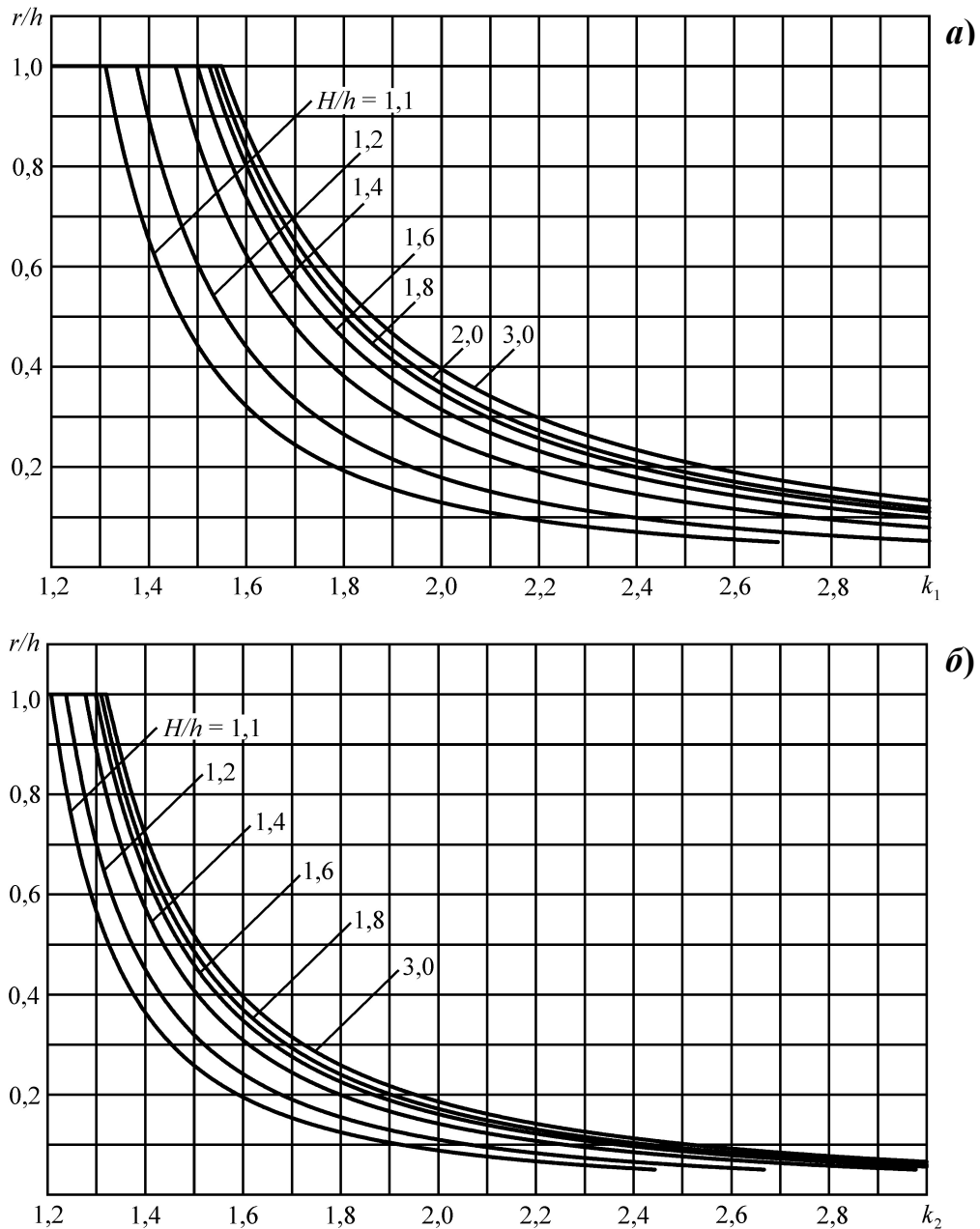


Рис. 1.3. Графіки залежностей оптимальних r/h від коефіцієнтів концентрації при різних H/h : а – для коефіцієнту концентрації k_1 при розтягу-стиску; б – для коефіцієнту концентрації k_2 при згині.

Криволінійні залежності кута α від коефіцієнтів концентрації k_1 або k_2 відповідають першій умові (1.1), коли прямолінійна кромка 5 існує (рис. 1.1, 1.2). Прямолінійні залежності відповідають другій умові (1.1), коли кромка 5 не існує, а має місце тільки кромка 6.

Якщо передбачається робота вузла в умовах сумісної дії розтягу-стиску та згину, то при проектуванні параметрів осередку слід використовувати величину коефіцієнту концентрації при розтягу-стиску k_1 . Це пов'язано з тим, що значення коефіцієнту концентрації при згині k_2 завжди менше при одних і тих же параметрах вузла. Тому, прийнявши для розрахунків величину k_1 , ми отримуємо оптимальні параметри осередку з декотрим запасом міцності.

Оптимальні значення кута нахилу α для фіксованих значень коефіцієнта концентрації k_1 при розтягу-стиску можливо визначати наступними залежностями

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} (0,09 \ln H_h + 0,12) \operatorname{arctanh} \left(\sin \left(\left(\frac{0,33}{\ln H_h} + 2,38 \right) \cdot (k_1 - 1) \right) \right), \\ \text{якщо } H - h > r(1 - \cos \alpha) \rightarrow \text{кромка 5 існує;} \\ (1,55 H_h - 0,24) k_1 - 1,51 H_h + 0,22, \quad \text{якщо } H - h > r(1 - \cos \alpha), \\ \text{якщо } H - h \leq r(1 - \cos \alpha) \rightarrow \text{кромки 5 немає;} \end{array} \right\} \quad (1.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{якщо } \alpha > \frac{\pi}{2} \rightarrow \alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \text{якщо } \alpha < 0,1396, (8^\circ) \rightarrow \alpha = 0,1396; \\ H_h = H / h, \quad \alpha, \text{rad.} \end{array} \right\}$$

Оптимальні значення відносного радіуса r/h для фіксованих значень коефіцієнта k_1 можливо визначати залежностями

$$\left. \begin{array}{l} \frac{r}{h} = \frac{0,31 \tanh(1,68 H_h - 1,47)}{\ln(0,83 k_1)} - 0,21 \tanh(2,16 H_h - 1,94), \\ \text{якщо } r/h > 1 \rightarrow r/h = 1, \quad \text{якщо } r/h < 0,05 \rightarrow r/h = 0,05; \\ H_h = H / h, \quad \alpha, \text{rad.} \end{array} \right\} \quad (1.4)$$

Формули (1.3), (1.4) справедливі при наступних обмеженнях

$$8^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ, \quad 0,05 \leq r/h \leq 1, \quad 1,2 \leq H/h \leq 3, \quad 1,2 \leq k_1 \leq 3. \quad (1.5)$$

Особливістю формул (1.3) є те, що при заданому коефіцієнті концентрації k_1 наперед невідомо, чи існує прямолінійна кромка 5, чи ні. Тому необхідно для встановленого k_1 перевірити наступну умову

$$\left. \begin{aligned} k_1 < k_{1d} &\rightarrow \text{кромка 5 існує, } k_1 \geq k_{1d} \rightarrow \text{кромки 5 немає,} \\ k_{1d} &= 0,56 \tanh\left(1,98 \frac{H}{h} - 1,477\right), \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Отримані залежності для α і r/h , за (1.3) і (1.4) отримані для верхнього обмеження $r/h \leq r_{h \max} = 1$.

Максимально допустимий коефіцієнт концентрації $k_{\max}$, який необхідно задіяти в (1.3), (1.4) визначиться як

$$k_{\max} = \frac{[\sigma]}{p \cdot n_k}, \quad (1.7)$$

де $n_k = 1,2$ – коефіцієнт запасу для коефіцієнта концентрації; $[\sigma]$ – допустимі приведені напруження; p – значення p_1 або p_2 (рис. 1.1).

Алгоритм знаходження оптимальних геометричних параметрів α і r/h при статичному пружному деформуванні можна представити наступним чином.

- 1) Визначити максимально допустиме значення коефіцієнту концентрації k_1 за (1.7) або з інших умов;
- 2) Перевірити умову (1.6) і визначити, чи існує кромка 5 (рис. 1.1, 1.2);
- 3) При заданому H/h і встановленому k_1 визначити α за графіком на рис. 1.2, *a* або за формулою (1.3) спираючись на умову п. 2; визначити r/h за графіком на рис. 1.3, *a* або за виразом (1.4).

Якщо на величину радіуса r накладаються обмеження, наприклад, з технологічних умов, то значення кута α при фіксованих k_1 , H/h , r/h можна обчислити, використовуючи наступний вираз

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 16,7 \arctan \left(\frac{1,82 \cdot (k_1 - 1) \cdot \left(\frac{r}{h}\right)^\beta}{\tanh\left(1,7 \frac{H}{h} - 1,2\right)} \right) \cdot \tanh\left(1,2 \frac{H}{h} - 0,5\right) \cdot \left(\frac{r}{h}\right)^\gamma, \\ \beta &= 0,7 - 0,16 \frac{h}{H}, \quad \gamma = -0,04 \frac{H}{h} - 0,25, \quad \alpha^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Оптимальне проектування при згині може бути здійснене аналогічним чином, але при цьому потрібно користуватися тільки графіками на рис. 1.2, *б* та рис. 1.3, *б*. Якщо оптимальне проектування проводиться тільки із застосуванням графіків як при розтягу-стиску так і при згині, то п. 2 вищенаведеного алгоритму не має сенсу.

Нижче наведені залежності для теоретичних коефіцієнтів концентрації, які можуть бути задіяні в подальших обчисленнях.

Для визначення теоретичного коефіцієнту концентрації k_1 при пружному розтягу-стиску для досліджуваного типового осередку б балки-стілки (рис. 1.1) пропонується наступна емпірична формула

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 1 + 0,55 \operatorname{th} \left(1,7 \frac{H}{h} - 1,2 \right) \left(\frac{r}{h} \right)^\gamma \operatorname{th} \left(0,06 \alpha \operatorname{cth} \left(1,2 \frac{H}{h} - 0,5 \right) \left(\frac{r}{h} \right)^\beta \right); \\ \gamma &= 0,16 \left(\frac{H}{h} \right)^{-1} - 0,7; \quad \beta = 0,04 \frac{H}{h} + 0,25; \quad \alpha^\circ, \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

де кут зламу α в цій та інших формулах для коефіцієнтів концентрації виражено в градусах.

Формула (1.9) дозволяє обчислити величину k_1 з відхиленням, що не перевищує $\pm 5\%$ при $1,2 \leq H/h \leq 3$; $0,05 \leq r/h \leq 1$; $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ відносно результатів отриманих за МСЕ.

Для визначення величини теоретичного коефіцієнту концентрації k_2 при пружному згині для того ж самого осередку концентрації напружень пропонується наступна емпірична формула

$$\left. \begin{aligned} k_2 &= 1 + 0,32 \operatorname{th} \left(1,8 \frac{H}{h} - 1,2 \right) \left(\frac{r}{h} \right)^\gamma \operatorname{th} \left(0,055 \alpha \operatorname{cth} \left(\frac{H}{h} - 0,5 \right) \left(\frac{r}{h} \right)^\beta \right); \\ \gamma &= 0,06 \left(\frac{H}{h} \right)^{-1} - 0,7; \quad \beta = 0,006 \frac{H}{h} + 0,26; \quad \alpha^\circ, \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

яка дозволяє обчислити величину k_2 з похибкою, яка не перевищує $\pm 5\%$ при $1,1 \leq H/h \leq 3$; $0,05 \leq r/h \leq 1$; $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ у порівнянні з результатами отриманими МСЕ.

Також були отримані інші менш точні емпіричні формули для розтягу-стиску і згині, які представлені в табл. 1.1, де кут α виражено в градусах.

Таблиця 1.1 – Емпіричні залежності теоретичних коефіцієнтів концентрації при розтягу-стиску і згині

№ п/п	Вид навантаження	Формула	Границі застосування	Погрішність відносно МСЕ, %
1	Розтяг- стиск	$k_1 = 1 + 0,55 \operatorname{th}(0,06\alpha) \operatorname{th} \left[\frac{0,65(H/h)^2}{\operatorname{th}(0,01\alpha^{1,5})} \right] \left(\frac{r}{h} \right)^\omega ;$ $\omega = \frac{0,003\alpha - 0,05}{H/h} - 0,18 \ln \alpha + 0,12; \quad \alpha^\circ,$	$1,1 \leq H/h \leq 3;$ $0,05 \leq r/h \leq 1;$ $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	± 10
2	Розтяг- стиск	$k_1 = 1 + \frac{0,36 \operatorname{th} \left[\left(\frac{40}{\alpha} + 0,8 \right) \frac{H}{h} - 1 \right]}{(r/h) + 7\alpha^{-1,1}} + 0,22 \operatorname{th}(0,05\alpha);$ $\alpha^\circ.$	$1,2 \leq H/h \leq 3;$ $0,05 \leq r/h \leq 1$ та $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	± 10
3	Розтяг- стиск	$k_1 = 1 + 0,19 \frac{r}{h} + \alpha \left(0,01 - 0,018 \ln \left(\frac{r}{h} \right) \right); \quad \alpha^\circ,$	$1,1 \leq H/h \leq 3;$ $0,05 \leq r/h \leq 1;$ $5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$	± 5
4	Згин	$k_2 = 1 + \frac{0,22 \operatorname{th} \left[\left(\frac{50}{\alpha} + 1 \right) \frac{H}{h} - 1 \right]}{(r/h) + 3,5\alpha^{-1}}; \quad \alpha^\circ$	$1,1 \leq H/h \leq 3;$ $0,05 \leq r/h \leq 1;$ $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	± 10
5	Згин	$k_2 = 1 + 0,15 \frac{r}{h} + \alpha \left(0,002 - 0,02 \ln \left(\frac{r}{h} \right) \right); \quad \alpha^\circ$	$1,1 \leq H/h \leq 3;$ $0,05 \leq r/h \leq 1;$ $5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$	± 6

2 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАЛЬНОГО ТА ПЕРЕВІРОЧНОГО РОЗРАХУНКУ БАЛКИ-СТІНКИ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

2.1 Допоміжні величини

Вважається, що балка-стінка (рис. 1.1) працює в умовах пружно-пластичного циклічного деформування. Тобто, величина зовнішнього номінального навантаження p (p_1 або p_2), що прикладене до кромки l балки-стінки змінюється за симетричним циклічним законом постійної амплітуди, а в осередку концентрації напружень в околі кромки b (рис. 1.1) мають місце пластичні деформації. Матеріал балки ідеальний пружно-пластичний.

Для ідеальних пружно-пластичних матеріалів значення відносної інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій $\bar{\varepsilon}_i$, і значення відносної інтенсивності пластичних деформацій $\bar{\varepsilon}_{ip}$, що визначаються залежностями

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{iey}}, \quad \bar{\varepsilon}_{ip} = \frac{\varepsilon_{ip}}{\varepsilon_{iey}}. \quad (2.1)$$

не залежать від границі плинності.

В (2.1) ε_i – абсолютне значення інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій; ε_{ip} – абсолютне значення інтенсивності пластичних деформацій; ε_{iey} – інтенсивність пружних деформацій, при яких починається пластичне деформування в осередку концентрації, що визначається залежністю

$$\varepsilon_{iey} = \frac{\sigma_s}{3G}, \quad (2.2)$$

де G – модуль зсуву; σ_s – границя плинності.

Для відносного навантаження $p/\sigma_s=0,9$ величина відносної інтенсивності пластичних деформацій $\bar{\varepsilon}_{ip0,9}$ в залежності від геометричних параметрів може бути визначена наступною емпіричною залежністю

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{ip0,9} &= a_0 r_h^\beta; \\ b_0 &= 0,12 H_h + 0,65; \quad b_1 = -0,44 H_h + 2,84; \\ \beta &= -b_0 \cdot \tanh(\alpha \cdot b_1); \\ a_0 &= 1,4 \cdot \tanh(H_h) - 0,14 \cdot \alpha; \\ r_h &= r / h, \quad H_h = H / h, \quad \alpha, \text{rad}, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

де величина $\bar{\varepsilon}_{ip0,9}$ визначається з відхиленням $\pm 9\%$, відносно результатів МСЕ у діапазоні параметрів

$$H / h \in [1,6; 2,4], \quad r / h \in [0,05; 0,2], \quad \alpha \in [20^\circ; 75^\circ]. \quad (2.4)$$

Перед використанням формули (2.3) слід впевнитись, що вузол знаходиться в умовах пружно-пластичного деформування. Для цього потрібно забезпечити виконання умови

$$p_{\min}^{rel} \leq p^{rel}; \quad p_{\min}^{rel} = 1 / k_1; \quad p^{rel} = p / \sigma_s, \quad (2.5)$$

де коефіцієнт концентрації k_1 визначається за формулою (1.9), або формулами табл. 1.1; $p_{\min}^{rel}$ – мінімальне відносне навантаження, при якому починається пружно-пластичне деформування в осередку концентрації; p^{rel} – відносне навантаження.

Для визначення відносної інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій $\bar{\varepsilon}_i$ в залежності від прикладеного зовнішнього навантаження можна використовувати наступну залежність

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_i &= \bar{\varepsilon}_i(p^{rel}) = a \cdot \exp(b \cdot \sin(p^{rel})), \\ a &= \left(\frac{1}{c}\right)^\beta, \quad b = \frac{\ln\left(\frac{1}{c}\right)}{p_{\min}^{rel} - 0,9}, \quad c = 1,8 \cdot \bar{\varepsilon}_{ip0,9} + 1, \quad \beta = -\frac{p_{\min}^{rel}}{p_{\min}^{rel} - 0,9}. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

де всі величини були пояснені вище. Ця залежність визначає величину $\bar{\varepsilon}_i$ з похибкою $\pm 12\%$ відносно результатів отриманих за МСЕ у діапазоні параметрів (2.4). При цьому додаткову поправку для $\bar{\varepsilon}_{ip0,9}$, пов'язану з похибкою обчислення враховувати не потрібно. При обчисленні $\bar{\varepsilon}_i$ за (2.6) виконання умови (2.5) обов'язкове.

Для визначення відносної інтенсивності пластичних деформацій $\bar{\varepsilon}_{ip}$ необхідно скористатись формулою

$$\bar{\varepsilon}_{ip} = \bar{\varepsilon}_i - 1, \quad (2.7)$$

але при цьому слід покласти $c = 1,6$ в (2.6), що пов'язано з проблемою малих різниць при малих p^{rel} при відніманні одиниці. Похибка визначення $\bar{\varepsilon}_{ip}$ за (2.7) при цьому становить не більше $\pm 21\%$ відносно результатів отриманих за МСЕ у діапазоні параметрів (2.4).

Розмах інтенсивності циклічних пружно-пластичних деформацій $\varepsilon_{i \text{ cycle}}$ та чисто пластичних $\varepsilon_{ip \text{ cycle}}$ деформацій, при $p/\sigma_s \leq 0,65$, можливо обчислювати за формулами

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{i \text{ cycle}} &= 2\bar{\varepsilon}_i \cdot \varepsilon_{iey} \cdot 1,12 \cdot 1,15, \\ \varepsilon_{ip \text{ cycle}} &= 2(\bar{\varepsilon}_i - 1) \cdot \varepsilon_{iey} \cdot 1,21 \cdot 1,15, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

де коефіцієнти 1,12 і 1,21 в цій формулі пов'язані з точністю емпіричних залежностей (2.6) і (2.7); коефіцієнт 1,15 враховує той факт, що циклічний розмах завжди більше за статичний.

Таким чином, алгоритм обчислення інтенсивності пружно-пластичних (повних) ε_i , пластичних ε_{ip} та пружних ε_{ie} деформацій в умовах статичного пружно-пластичного деформування балки-стілки в осередку концентрації напружень b (рис. 3.2), а також розмах інтенсивності циклічних пружно-пластичних деформацій $\varepsilon_{i \text{ cycle}}$ та чисто пластичних $\varepsilon_{ip \text{ cycle}}$ деформацій, при $p/\sigma_s \leq 0,65$ може бути представлена наступним чином.

1) Для заданих геометричних параметрів досліджуваного вузла на рис. 1.1 визначається коефіцієнт концентрації k_1 за формулою (1.9) або формулами табл. 1.1.

2) Визначається відносне навантаження p^{rel} за 3-м виразом (2.5) для заданого зовнішнього навантаження p .

3) Визначається мінімальне відносне навантаження p_{min}^{rel} за 2-м виразом (2.5), при якому починається пружно-пластичне деформування.

4) Перевіряється 1-ша умова (2.5). Якщо 1-ша умова виконана, то балка-стілка перебуває в стані пружно-пластичного деформування і слід перейти до наступного п. 5. Якщо 1-ша умова (2.5) не виконана, то балка-стілка перебуває в стані тільки пружного деформування; інтенсивність пластичних деформацій дорівнює нулю, тобто $\varepsilon_{ip} = 0$, а інтенсивність пружних деформацій ε_{ie} дорівнює

$$\varepsilon_{ie} = \frac{p \cdot \sigma_s}{3G \cdot p_{\min}}, \quad \varepsilon_{ie} = \frac{p \cdot \varepsilon_{iey}}{p_{\min}};$$

на цьому слід зупинитися.

5) Обчислити $\bar{\varepsilon}_{ip0,9}$ за (2.3), що відповідає відносному навантаженню $p^{rel}=0,9$ для пружно-пластичного деформування.

6) Знайти $\bar{\varepsilon}_i$ (2.6) в залежності від прикладеного відносного навантаження p^{rel} , а потім ε_i за формулою $\varepsilon_i = \bar{\varepsilon}_i \cdot \varepsilon_{iey}$, що виводиться з (2.1).

7) Визначити за потребою значення інтенсивності повних пластичних деформацій ε_{ip} за однією з формул

$$\varepsilon_{ip} = \varepsilon_{iey}(\bar{\varepsilon}_i - 1), \quad \varepsilon_{ip} = \varepsilon_i - \varepsilon_{iey}.$$

8) Розрахувати циклічні деформації за (2.8).

Вищенаведений алгоритм представлений на рис. 2.1 у вигляді блок-схеми.

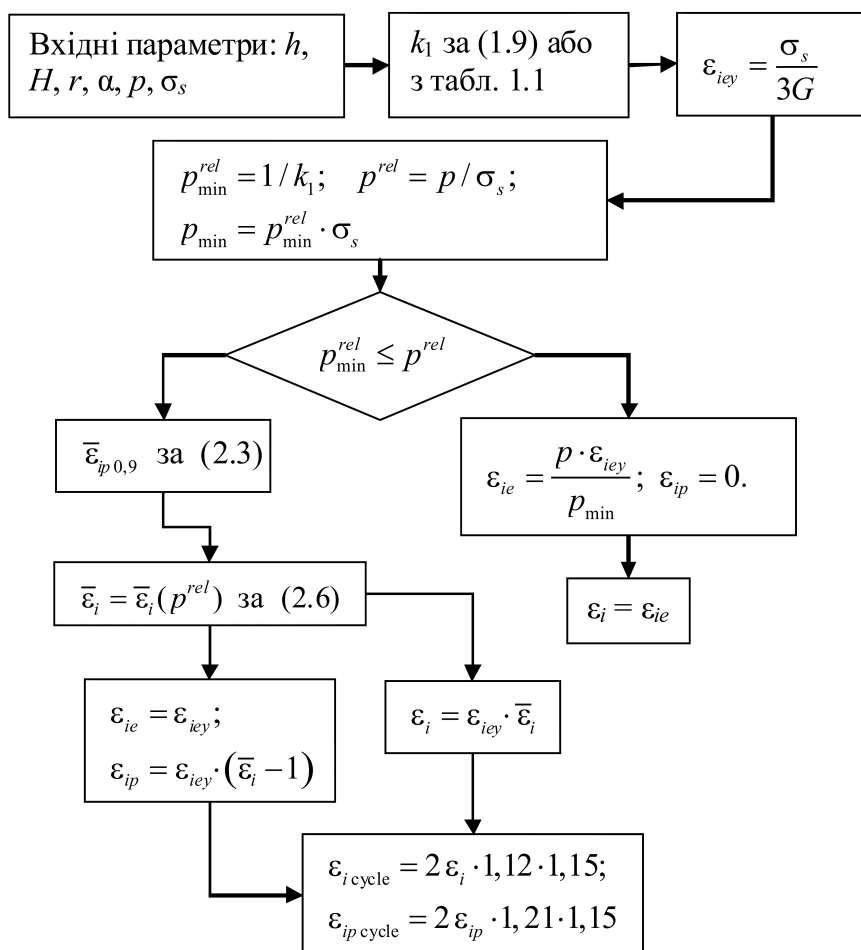


Рис. 2.1. Блок-схема алгоритму визначення циклічних пружно-пластичних деформацій

В табл. 2.1 представлено низку найбільш застосовуваних деформаційних критеріїв оцінки втомної довговічності при наявності пружно-пластичних

деформацій, для матеріалів з границею міцності $\sigma_B < 700$ МПа, виписаних з [1], де в свою чергу приведено посилання на першоджерела.

Таблиця 2.1 – Деформаційні критерії, що можуть бути задіяні в методиках розрахунку балки-стілки при циклічному пружно-пластичному деформуванні

№ п/п	Найменування залежності	Формула
1	Менсона	$\varepsilon = \varepsilon_f^{0,6} \cdot N^{-0,6} + 3,5 \frac{\sigma_B}{E} N^{-0,12}$
2	Лангера	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{2N^{0,5}} + \frac{2\sigma_{-1}}{E}$
3	Коффіна-Менсона	$\frac{\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c$
4	V. Subramanya Sarma і K. A. Padmanabhan або SP (для середньовуглецевої та малолегованої сталі)	$\varepsilon = 1,17 \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{0,832} N^{-0,09} + 0,0266 \varepsilon_f^{0,155} \left(\frac{\sigma_B}{E} \right)^{-0,53} N^{-0,56}$
5	Критерій SWT (Smith-Watson-Topper)	$\frac{\sigma_{\max} \cdot \varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N)^{b+c}$

У формулах табл. 2.1 прийняті наступні позначення:

ε – розмах інтенсивності пружно-пластичних деформацій циклічної діаграми;

$\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1 - \psi_k}$ – істинне відносне видовження в місці утворення шийки після розриву,

або істинна деформація руйнування (fracture ductility);

ψ_k – відносне звуження в місці утворення шийки після розриву;

σ_{-1} – границя витривалості при симетричному циклі на базі 10^6 циклів;

σ_B – границя міцності; σ_m – середні напруження;

$R_\varepsilon = \varepsilon_{\min} / \varepsilon_{\max}$ – коефіцієнт асиметрії циклу деформацій; $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ – коефіцієнт асиметрії циклу напружень; σ'_f , ε'_f – коефіцієнти втомної міцності і пластичності відповідно; b , c – постійні.

Коефіцієнти σ'_f , ε'_f , b , c визначаються експериментально і залежать від багатьох параметрів. Багатьма авторами здійснювалися спроби узагальнити результати досліджень величин σ'_f , ε'_f , b , c і представити їх у вигляді функцій від механічних характеристик матеріалів при статичному та циклічному навантаженнях.

В [1] наведено джерела, де можна знайти дослідження та аналіз параметрів σ'_f , ε'_f , b , c від різних факторів. В [1] показано (з посиланням на відповідну роботу), що для вуглецевих та низьколегованих пластичних сталей

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_f &= (0,92 \dots 1,15)\sigma_f, & \varepsilon'_f &= (0,35 \dots 1,0)\varepsilon_f, \\ b &= -0,12, & c &= -0,6, \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

де σ_f – істинні напруження при розриві.

Для вуглецевих і низьколегованих пластичних сталей величина σ_f може бути обчислена за формулою [2]

$$\sigma_f = \sigma_B(1 + 1,4\psi_K). \quad (2.10)$$

Найбільш консервативна оцінка при використанні (2.9) має місце при

$$\sigma'_f = 0,92\sigma_f, \quad \varepsilon'_f = 0,35\varepsilon_f, \quad (2.11)$$

а найбільш прогресивна оцінка буде при

$$\sigma'_f = 1,15\sigma_f, \quad \varepsilon'_f = 1,0\varepsilon_f. \quad (2.12)$$

2.2 Методика розрахунку

Методика *перевірочного* розрахунку балки-стілки з використанням деформаційних критеріїв виглядає наступним чином.

1) Задати: розмах номінальних циклічних навантажень p , $[-p; +p]$ постійної амплітуди; геометричні параметри H , h , r , α ; границю плинності матеріалу σ_s .

2) За відомими параметрами п. 1 визначити розмах пружно-пластичних циклічних деформацій $\varepsilon = \varepsilon_{i \text{ cycle}}$ в небезпечній точці осередкової зони балки-стілки за (2.8) або алгоритмом рис. 2.1.

3) За відомим ε знайти кількість циклів N до появи втомного пошкодження, використавши один з відомих деформаційних критеріїв, наприклад з табл. 2.1, при необхідності використавши коефіцієнти запасу по навантаженню і довговічності.

Методика *проектувального* розрахунку балки-стілки з використанням деформаційних критеріїв виглядає наступним чином.

1) Задати: кількість циклів N до появи втомного пошкодження; відношення висот H/h .

2) Використавши один з деформаційних критеріїв, наприклад з табл. 2.1, знайти розмах циклічних пружно-пластичних деформацій ε в небезпечній точці осередкової зони.

3) За відомим ε обчислити теоретичний коефіцієнт концентрації K_t за формулою

$$K_t = \sqrt{\frac{3G \cdot \sigma_s \cdot \varepsilon}{(2 \div 2,6)p^2 \cdot c}}, \quad c = 1, \quad (2.13)$$

4) Знаючи теоретичний коефіцієнт концентрації K_t , знайти оптимальні значення r і α за методиками оптимального проектування балки-стілки, представлених розділі 1.2 (глава 1) методики.

У формулі (2.13) теоретичний коефіцієнт K_t за замовчуванням визначений для розтягу-стиску, тобто $K_t = k_1$. Якщо є впевненість, що балка-стілка працює тільки на згин, то можна покласти $K_t = k_2$. Проте, якщо балка-стілка працює при сумісній дії розтягу-стиску і згину, то треба вважати, що $K_t = k_1$.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Трощенко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные и энергетические критерии. Проблемы прочности. Київ: ИПП, 2006. № 1. С. 5–31.
- 2 Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

СПИСОК АВТОРІВ

Виконавці:

Асистент

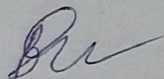
(підпис, дата)

Соков В.М.

СПИСОК АВТОРІВ

Виконавці:

Асистент



13. XII. 2021

(підпис, дата)

Соков В.М.