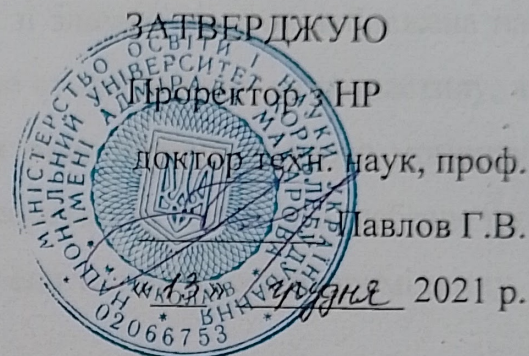


Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова



**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРУЖНОЇ ТА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОЇ ШИРИНИ ВІЛЬНОГО ФЛАНЦЮ СУДНОВОЇ БАЛКИ ЗІ
ЗЛАМОМ КРОМОК**

УКФА 360232.006М

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 РОЗРАХУНКУ ПРУЖНОЇ ТА ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОЇ ШИРИНИ ВІЛЬНОГО ФЛАНЦЮ СУДНОВОЇ БАЛКИ ЗІ
ЗЛАМОМ КРОМОК**

УКФА 360232.006М

Зав. сектором С і М

Уразманов Ф.Х.

1 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРУЖНОЇ ЕФЕКТИВНОЇ ШИРИНИ БАЛКИ ЗІ ЗЛАМОМ КРОМОК

1.1 Загальні положення

Об'єктом розрахунку є типова суднова балка зі зломом кромки зображена на рис. 1.1. Ця балка нижньою прямолінійною кромкою стінки кріпиться до настилу, а до ламаної кромки кріпиться вільний фланець для підвищення осьового моменту опору, що призводить до підвищення міцності і жорсткості при згині, забезпечує стійкість при дії осьових стискуючих та поперечних сил та при плоскій формі згину.

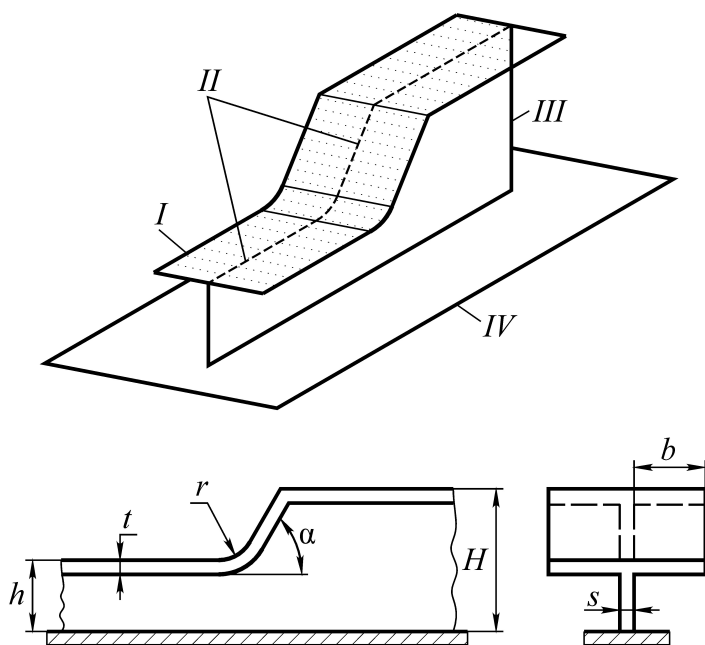


Рис. 1.1. Загальний вигляд досліджуваної балки зі зломом кромки: *I* – вільний фланець; *II* – ламана кромка стінки; *III* – стінка; *IV* – обшивка

Для балок зі зломом кромки на рис. 1.1 немає залежностей для визначення ефективної ширини вільного фланцю на похилій частині та в місцях зламу при пружному та пружно-пластичному деформуванні, що дає змогу розраховувати її міцність в рамках простої балочної теорії.

Класична методика визначення ефективної ширини для вільного фланцю не може бути застосована на похилій ділянці по причині його складної депланації. Характеристики НДС для обчислення ефективної ширини повинні збиратися в нейтральному шарі вільного фланцю, де відсутні згинальні нормальні напруження,

викликані місцевим згином полотна, і, які не треба враховувати при обчисленні ефективної ширини.

Було доведено, що положення нейтрального шару можна приймати розташованим на серединній поверхні фланцю, незважаючи на те, що його дійсне положення довільне. Доведено, що на похилій ділянці фланцю для визначення ефективної ширини необхідно використовувати спроектовані характеристики НДС на похилу поверхню вільного фланцю (для осей $x'O'y'$) (рис. 1.2). В цьому випадку для визначення ефективної ширини можливо використовувати класичну методику її визначення.

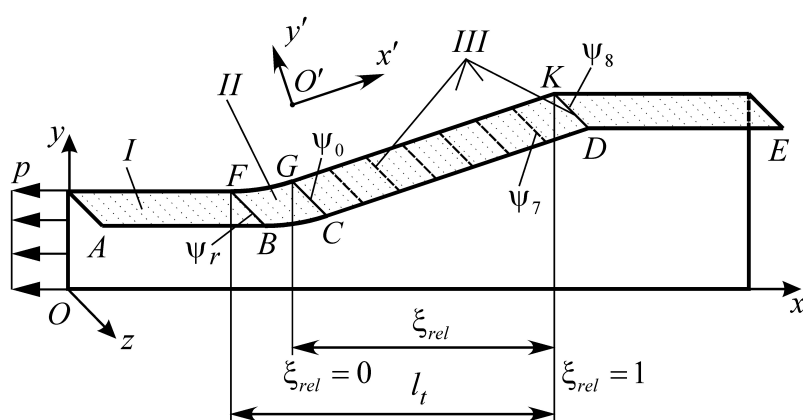


Рис. 1.2. Додаткова інформація: *I* – серединна поверхня фланця; *II* – область заокруглення; *III* – лінії досліджування характеристик НДС

В розрахунковій схемі балки зі зломом кромки з вільним фланцем приймається, що нейтральний шар співпадає з обшивкою *IV* (рис. 1.1), а зовнішнє навантаження, що прикладене тільки до торця меншої стінки на всій ділянці h , відповідає розтягу-стиску p (рис. 1.2). Це найбільш несприятлива розрахункова схема.

Для визначення ефективної ширини характеристики НДС збиралися в перерізах, що відповідають лініям FB , GC , KD , а також 8-ми рівновіддаленим досліджуваним лініям *III* (рис. 1.2), що лежать на відрізку CD .

Редукційні коефіцієнти ψ , що використовуються для обчислення ефективної ширини, обчислюються за формулою

$$\psi = \frac{b_{ef}}{b}, \quad b_{ef} = \psi b, \quad (1.1)$$

де b_{ef} , b – ефективна і дійсна ширини фланців.

На основі обробки масиву даних, отриманих із застосуванням МСЕ, розроблено наступну універсальну формулу для визначення ψ_r в перерізі FB

$$\left. \begin{aligned} \psi_r &= \psi'_r - 0,05 \sin(0,45 \psi'_r); \quad \psi'_r = a_2 b_h^\beta; \\ \beta &= 0,16 - (0,28 r_h + 1) \exp(-(0,05 \ln(r_h) + 1,94) a_2); \\ a_2 &= a_0 \tanh(a_1 \alpha) + 1,023; \\ a_0 &= (2,8 r_h + 0,74) t_h + 0,19 r_h - 0,95; \\ a_1 &= \frac{0,24 r_h + 0,42}{t_h^{0,6}}, \\ t_h &= t / h, \quad b_h = b / h, \quad r_h = r / h, \quad \alpha, rad; \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Розходження між ψ_r , отриманими за формулою (1.2) відносно результатів МСЕ у діапазоні параметрів

$$\left. \begin{aligned} t / h &\in [0,02; 0,1], \quad b / h \in [0,1; 0,5], \quad r / h \in [0,1; 0,5], \quad \alpha \in [3^\circ; 60^\circ], \\ H / h &\in [1,6; 2,8], \quad \text{и} \quad H / h < 1,6 \quad \text{якщо} \quad l_t / h > 5,4, \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

не перевищує $\pm 12\%$.

Редукційний коефіцієнт ψ_0 для лінії/перерізу CG (рис. 1.2) можна визначити за допомогою виразу

$$\left. \begin{aligned} \psi_0 &= \psi_r (1,0 - (0,8 b_h - 2,2 t_h) (0,7 \alpha - 0,03 r_h + 0,02)); \\ t_h &= t / h, \quad b_h = b / h, \quad r_h = r / h, \quad \alpha, rad, \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

використовуючи який, ψ_0 можна визначити з похибкою $(-12\%, +16\%)$ у порівнянні із даними розрахованими за МСЕ, якщо кут $\alpha \leq 30^\circ$; $(-18\%, +16\%)$ для $\alpha \leq 45^\circ$; $\pm 18\%$ для $\alpha \leq 60^\circ$ і для решти параметрів (1.3), приймаючи до уваги, що ψ_r визначається за (1.2), а розбіжності обчислювалися відносно даних ψ_0 , розрахованих із застосуванням МСЕ.

У результаті обробки отриманих за допомогою МСЕ даних запишемо наступну залежність для визначення редукційного коефіцієнта ψ_7 в перерізі, що відповідає 7-й досліджуваній лінії (рис. 1.2)

$$\left. \begin{aligned} \psi_7 &= a_3 \exp(\beta b_h), \\ a_3 &= (0,03 H_h - 0,07 \alpha - 0,8 t_h - 0,1) \beta + 1,0; \\ \beta &= a_0 \exp(a_1 t_h); \\ a_0 &= -(0,16 H_h + 1,14) \ln(\alpha) + 1,24 H_h - 5,6; \\ a_1 &= (85,0 - 30,0 H_h) \alpha + 20,0 H_h - 62,0; \\ t_h &= t / h, \quad b_h = b / h, \quad H_h = H / h, \quad \alpha, rad, \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

з якої ψ_7 можна обчислити з похибкою у діапазоні $\pm 14\%$ відносно результатів отриманих за МСЕ для кутів $\alpha \leq 30^\circ$ і діапазону (1.3) решти параметрів.

При збільшенні кута α коефіцієнт ψ_7 завжди менший, ніж повинен бути, і максимальна розбіжність сягає при цьому до 66% для $\alpha = 45^\circ$ в безпечну сторону. На лінії KD (рис. 1.2) має місце складна робота полотна, яка потребує додаткових досліджень, а тому редукційний коефіцієнт ψ_8 на лінії KD не визначався.

Запропоновано менш точні формули для визначення редукційного коефіцієнту ψ_r в перерізі FB на основі формули Суслєва В.П.

Скориговану формулу Суслєва для визначення редукційного коефіцієнта ψ_r в небезпечному перерізі FB (рис. 1.2) можна записати так

$$\psi_r = \frac{1}{1 + 0,23 \frac{b}{t} \alpha}; \quad \alpha, \text{rad}; \quad \alpha \leq 10^\circ, \quad (1.6)$$

яка визначає ψ_r з похибкою не більше 9% відносно значень розрахованих за МСЕ в діапазоні параметрів

$$\left. \begin{aligned} t/h \in [0,02; 0,1], \quad b/h \in [0,1; 0,5], \quad r/h \in [0,1; 0,5], \\ \alpha \in [3^\circ; 75^\circ], \quad H/h \in [1,2; 2,8], \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

але для кутів $\alpha \leq 10^\circ$.

При подальшій модифікації формули Суслєва було враховано вплив радіуса заокруглення r :

$$\psi_r = \frac{0,17(r/h) + 1,0}{1 + 0,3 \frac{b}{t} \alpha}; \quad \alpha, \text{rad}; \quad \alpha \leq 20^\circ. \quad (1.8)$$

Тут розходження відносно розрахованих значень ψ_r за МСЕ знаходяться в межах $\pm 16\%$ для $\alpha \leq 20^\circ$ і діапазону зміни решти параметрів (1.7).

Величина редукційного коефіцієнта $\psi_t(\xi_{rel})$ вздовж похилої частини може бути визначена за наступною лінійною залежністю:

$$\psi_t(\xi_{rel}) = \frac{\xi_{rel}}{0,875}(\psi_7 - \psi_0) + \psi_0, \quad \xi_{rel} \in [0; 0,875]. \quad (1.9)$$

Ефективну ширину по відомому редукційному коефіцієнту можна обчислити за (1.1).

Для перестраховки, пов'язаної з відотною похибкою емпіричних формул, можна застосувати так званий коефіцієнт безпечності $k_\psi = 0,877$, якщо кут $\alpha \leq 30^\circ$ (для розбіжності -14% для ψ_7), помножаючи на нього ψ_r або ψ_0 і ψ_7 перед використанням (1.9) для $\psi_t (\xi_{rel})$.

2 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОЇ ШИРИНИ БАЛКИ ЗІ ЗЛАМОМ КРОМОК

2.1 Методика розрахунку

Дослідження ефективної ширини (і відповідно редуційного коефіцієнту) велися тільки для перерізу FB , як найбільш небезпечного, тому що при навантаженні $p/\sigma_s \leq 0,9$ (де σ_s – границя плинності) пластичне деформування не виходить за межі області $FBCG$ (рис. 1.2). При визначенні ефективної ширини і редуційного коефіцієнту використовувались загальновідомі залежності, тільки замість нормальних напружень σ_x в них використовувалися інтенсивності напружень σ_i , що дало змогу більш повно врахувати розподіл НДС.

Для відносного навантаження $p/\sigma_s=0,9$ величина редуційного коефіцієнту $\psi_{0,9}$ в залежності від геометричних параметрів для перерізу FB може бути визначена наступною емпіричною залежністю

$$\left. \begin{aligned} \psi_{0,9} &= a_0 \exp(a_1 b_h); \\ b_0 &= 0,1 \ln r_h + 3,17 t_h + 0,87; \\ \beta &= 0,25 r_h + 0,56 t_h - 0,23; \\ a_0 &= b_0 \alpha^\beta; \\ d_0 &= 0,48 r_h - 6,10 t_h - 1,085; \\ \gamma &= (2,2 t_h - 0,2) \ln r_h + 0,28 \ln t_h + 0,77; \\ a_1 &= d_0 \alpha^\gamma; \\ b_h &= b/h; \quad r_h = r/h; \quad t_h = t/h; \quad \alpha, rad, \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

використовуючи яку, можна визначити величину редуційного коефіцієнту $\psi_{0,9}$ з відносною похибкою, що не перевищує $\pm 10\%$ відносно результатів отриманих за МСЕ для діапазону геометричних параметрів

$$t/h \in [0,02; 0,08], \quad b/h \in [0,2; 0,5], \quad r/h \in [0,1; 0,5], \quad \alpha \in [10^\circ; 60^\circ]. \quad (2.2)$$

Для відносного навантаження, що визначене в межах $0,78 \leq p/\sigma_s \leq 0,82$, що відповідає $p/\sigma_s \approx 0,8$, величина редуційного коефіцієнту $\psi_{0,8}$ в залежності від геометричних параметрів може бути визначена наступною емпіричною залежністю

$$\left. \begin{aligned} \psi_{0,8} &= a_0 \exp(a_1 b_h); \\ b_0 &= 0,11 \ln r_h + 0,78 t_h + 0,92; \\ \beta &= 0,514 r_h - 6,2 t_h - 0,088; \\ a_0 &= b_0 \alpha^\beta; \\ d_0 &= 0,27 r_h + 3,3 t_h - 1,31; \\ \gamma &= (7 t_h - 0,1) \ln r_h - 0,19 \ln t_h - 0,61; \\ a_1 &= d_0 \alpha^\gamma; \\ b_h &= b / h; \quad r_h = r / h; \quad t_h = t / h; \quad \alpha, rad, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

що визначає величину редуційного коефіцієнту $\psi_{0,8}$ з відносною похибкою, що не перевищує $\pm 8\%$ відносно результатів отриманих за МСЕ для діапазону геометричних параметрів (2.2).

Перед використанням формул (2.1) або (2.3) для редуційного коефіцієнту ψ слід впевнитись, що вузол знаходиться в умовах пружно-пластичного деформування. Для цього потрібно забезпечити виконання умови

$$p_{\min}^{rel} \leq p^{rel}, \quad p_{\min}^{rel} = 1 / k_F, \quad p^{rel} = p / \sigma_s, \quad (2.4)$$

де $p_{\min}^{rel}$ – мінімальне відносне навантаження, при якому починається пружно-пластичне деформування вільного фланцю в небезпечному перерізі, починаючи з точки F ; p^{rel} – відносне навантаження, що дорівнює 0,9 для (2.1) і $\approx 0,8$ для (2.3); k_F – коефіцієнт концентрації в точці F (рис. 1.2) відносно номінального навантаження p (рис. 1.2), який визначається залежністю

$$\left. \begin{aligned} k_F &= a_0 \tanh(a_1 \alpha); \\ c_0 &= 30 \tanh(30 b_h^3); \quad c_1 = -50 b_h - 14; \\ b_0 &= c_0 r_h + c_1; \quad b_1 = 6,4 r_h + 2,6 b_h + 4,7; \\ a_1 &= b_0 t + b_1; \quad a_0 = (r_h - 0,59)(t_h - 0,28)(b_h + 7,4) + 0,15 a_1; \\ r_h &= r / h; \quad t_h = t / h; \quad b_h = b / h; \quad \alpha, rad, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

де коефіцієнт концентрації k_F визначається з відхиленням $\pm 7\%$ відносно даних отриманих по МСЕ.

Залежність пружно-пластичної ефективної ширини і відповідного редуційного коефіцієнту є дещо нелінійною в залежності від прикладеного (зростаючого) навантаження. Для спрощення розрахунків була створена лінійна залежність, яка забезпечує отримання безпечних результатів.

Для визначення редукційного коефіцієнту $\psi(p^{rel})$ при пружно-пластичному деформуванні в залежності від прикладеного навантаження для перерізу FB в рамках запропонованого підходу можна використовувати наступну залежність

$$\psi(p^{rel}) = \frac{(p^{rel} - p_{min}^{rel})(\psi_{0,9} - \psi_e)}{0,9 - p_{min}^{rel}} + \psi_e, \quad (2.6)$$

де ψ_e – редукційний коефіцієнт при пружному деформуванні, який визначається залежністю (1.2), тобто $\psi_e = \psi_r$.

Ефективну ширину по відомому редукційному коефіцієнту можна обчислити за (1.1).

Таким чином, алгоритм обчислення редукційного коефіцієнту ψ і відповідно ефективної ширини b_{ef} в умовах пружно-пластичного деформування вільного фланцю досліджуваної балки (рис. 1.1) в небезпечному перерізі FB (рис. 1.2) може бути представлена наступним чином.

1) Для заданих геометричних параметрів досліджуваного вузла визначається коефіцієнт концентрації k_F за (2.5).

2) Визначається редукційний коефіцієнт при пружному деформуванні ψ_e за (1.2).

3) Обчислюється відносне навантаження p^{rel} за 3-м виразом (2.4) для заданого зовнішнього навантаження p .

4) Визначається мінімальне відносне навантаження p_{min}^{rel} за 2-м виразом (2.4), при якому починається пружно-пластичне деформування.

5) Перевіряється 1-ша умова (2.4). Якщо 1-ша умова виконана, то фланець перебуває в стані пружно-пластичного деформування і слід перейти до наступного п. 6. Якщо 1-ша умова (2.4) не виконана, то фланець перебуває в стані тільки пружного деформування; редукційний коефіцієнт при цьому дорівнює $\psi = \psi_e$ обчисленому в 2-му пункті, а ефективна ширина b_{ef} знайдеться з виразу (1.1)

$$b_{ef} = \psi b;$$

на цьому слід зупинитися.

6) Обчислити редукційний коефіцієнт $\psi_{0,9}$ за (2.1), що відповідає відносному навантаженню $p^{rel}=0,9$ для пружно-пластичного деформування.

7) Застосувати формулу (2.6) для визначення редукційного коефіцієнту $\psi(p^{rel})$ в умовах пружно-пластичного деформування в залежності від прикладеного відносного навантаження p^{rel} ; обчислити ефективну ширину b_{ef} за (1.1).

Алгоритм обчислення ефективної ширини при пружно-пластичному деформуванні представлена на рис. 2.1 у вигляді блок-схеми алгоритму.

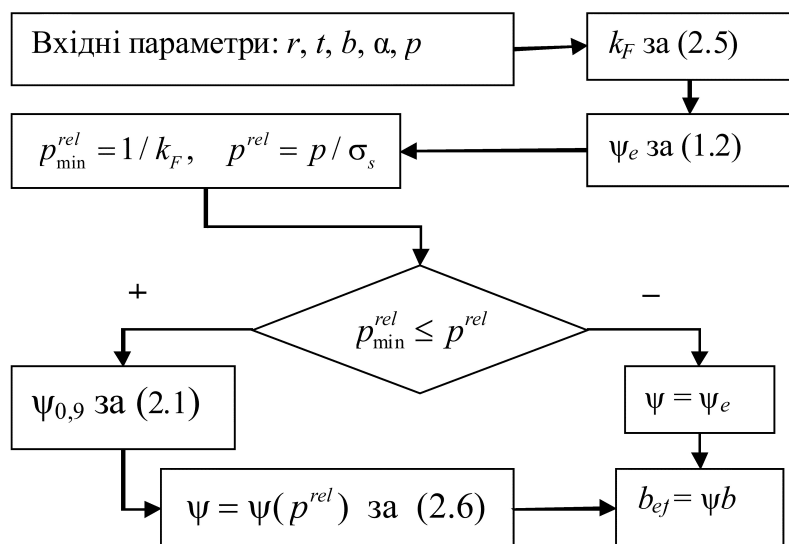


Рис. 2.1. Блок схема алгоритму визначення редукційного коефіцієнту ψ і ефективної ширини b_{ef} при пружно-пластичному деформуванні

Для врахування погрішності емпіричних формул необхідно значення редукційних коефіцієнтів $\psi_{0,9}$, ($\psi_{0,8}$), ψ_e помножити на 0,9 (точно на 0,892 для 12 % відхилення в найгіршому випадку) для окремих розрахунків і/або перед використанням (2.6).

СПИСОК АВТОРІВ

Виконавці:

Асистент

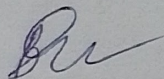
(підпис, дата)

Соков В.М.

СПИСОК АВТОРІВ

Виконавці:

Асистент



13. XII. 2021

(підпис, дата)

Соков В.М.