Стійкість холодногнутих швелерів з урахуванням пластичних властивостей маловуглецевих сталей

Білик С.І., д.т.н., **Білик А.С.,** к.т.н., **Усенко М.В.,** асистент,
Золотопольський О.Е.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація: У статті розглянуто практичні питання апроксимації діаграми сталі на ділянці розвитку пластичних деформацій. Визначено критерій опору згинанню для стрижнів постійного перерізу при апроксимації експериментальної діаграми пластичної роботи сталі. Визначено критерії опору згинанню для холодногнутих швелерів в пружній області напружено-деформованого стану для вуглецевої сталі.

Аннотация. Статья содержит практические вопросы аппроксимации диаграммы стали на участке развития пластических деформаций. Определен критерий сопротивления изгибу для стержней постоянного сечения при аппроксимации экспериментальной диаграммы пластической работы стали. Определены критерии сопротивления изгибу для холодногнутых швеллеров в упругой области напряженно-деформированного состояния для углеродистых сталей.

Abstract. The article considers the practical questions on approximation of diagram of steel by sedate dependences. There was the buckling résistance criterion found for the columns with the constant cross-section with approximation of experimental plastic diagram of the steel. There was buckling resistance criterion found of the columns of cold-formed steel channels with inelastic range stress-strain curves of carbon steel.

Ключові слова: холодногнутий швелер, пластичні деформації.

Актуальність проблеми. Широке використання тонкостінних холодногнутих профілів обумовлено переходом на нові ефективні технологічні рішення сталевих конструкцій: арки, прогони, рами, балки змінного перерізу та з гофрованою стінкою [1]. Їх використання дає підстави визначити загальну тенденцію розвитку сучасних сталевих конструкцій будівель різноманітного призначення, а саме – використання універсальних елементів і профілів, високотехнологічних у виготовленні та монтажі, а також компактних у транспортуванні. Але вдосконалення конструктивних рішень і підвищення точності їх розрахунку на стійкість і міцність залежать від точності врахування діаграми розтягу сталі на ділянці розвитку пластичних деформацій, а також від урахування початкових недосконалостей та залишкових напружень [6–9]. Уведення до розрахунку стійкості елементів рам із нових профілів із використанням апроксимацій діаграми розтягу сталі на ділянці розвитку пружно-пластичних деформацій відкриває напрямок створення сучасного теоретичного розрахункового апарату. В подальшому це дасть можливість створити базу наукового обґрунтування власних коефіцієнтів повздовжнього згину для вказаних ефективних конструкцій з урахуванням особливостей технології виготовлення певного обраного заводу.

Огляд останніх досліджень. Питаннями апроксимації діаграми сталі на ділянці розвитку пластичних деформацій присвячені роботи [2–6]. Проте, досліджень у напрямку вдосконалення розрахункового апарату тонкостінних гнутих профілів на стійкість із урахуванням розвитку обмежених пластичних деформацій та апроксимації діаграми розтягу сталі на ділянці розвитку пластичних деформацій, на нашу думку, недостатньо. Для аналітичних та числових досліджень стійкості холодногнутих профілів представляється необхідним розробити узагальнений підхід для апроксимації маловуглецевих сталей та сталей підвищеної міцності. В роботі авторами [7] запропоновано підхід щодо розрахунку коефіцієнтів повздовжнього згину центрально-стиснутих стрижнів з урахуванням дійсної діаграми розтягу сталі за умови апроксимації пластичних деформацій степеневою залежністю. Викладені дослідження є продовженням робіт [12–14].

Запропоновано узагальнену апроксимацію діаграми розтягу сталі на ділянці розвитку пластичних та пружно-пластичних деформацій за степеневою залежністю:

$$\sigma_i = a_1 + a_2(\varepsilon_y - \varepsilon_i)^n + a_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_i)^m . \qquad (1, а)$$

Тепер дотичний модуль приймається через похідну від поточних напружень:

$$E_t = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon} = -na_2(\varepsilon_y - \varepsilon_i)^{n-1} - ma_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_i)^{m-1} . \qquad (1, б)$$

У формулі (1) через σ_i і ε_i відповідно позначено поточні напруження і відносне видовження в проміжній точці діаграми, через a_1, a_2, a_3 позначені невідомі коефіцієнти.

Умовами для визначення невідомих коефіцієнтів a_1, a_2, a_3 для маловуглецевих сталей є значення модулів розтягу сталі й відповідних напружень у точках на межі пружної і пластичної роботи, а також кінцеве значення пластичних деформацій і дотичного модуля при розрахунковому опорі сталі. Так, початком розвитку пластичних деформацій є верхня границя пружних напружень і верхня границя пружних деформацій: $\varepsilon_{i=1} = \varepsilon_e$, $\sigma_{i=1} = \sigma_e$, а кінцева точка пластичних деформацій є значення розвитку пластичних деформацій $\varepsilon_{i=n} = \varepsilon_y$, в якій напруження дорівнюють границі текучості сталі σ_y, а модуль пружності – достатньо малій величині (E_{tm}). Такі умови приводять до наступних рівнянь при використанні апроксимацій (1):

$$\varepsilon_{i=n} = \varepsilon_y \rightarrow \sigma_{i=n} = a_1 + a_2(\varepsilon_y - \varepsilon_i)^n + a_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_i)^m = \sigma_y \rightarrow a_1 = \sigma_y . \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{i=n} = \varepsilon_y \rightarrow$$

$$E_{t(\varepsilon_{i=n}=\varepsilon_y)} = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon} = -na_2(\varepsilon_y - \varepsilon_y)^{n-1} - ma_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_y)^{m-1} = E_{tm} \rightarrow -ma_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_y)^{m-1} = E_{tm} . \qquad (3)$$

$$\varepsilon_{i=1} = \varepsilon_e \rightarrow E_{t(\varepsilon_{i=1}=\varepsilon_e)} = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon} = -na_2(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{n-1} - ma_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_e)^{m-1} = E . \qquad (4)$$

$$\sigma_e = a_1 + a_2(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^n + a_3(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_e)^m . \qquad (5)$$

При m =1, та за умовами (2, 3), які дають величини невідомих коефіцієнтів $a_1 = \sigma_y$, та $a_3 = -E_{tm}$, рівняння (2, 3, 4, 5) об’єднуються в систему двох рівнянь із двома невідомими.

$$\begin{cases} \sigma_e = \sigma_y + a_2(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^n - E_{tm}(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_e) \\ E_{t(\varepsilon_{i=1}=\varepsilon_e)} = -na_2(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{n-1} + E_{tm} = E \end{cases} \rightarrow$$

$$\begin{cases} a_2 = \dfrac{\sigma_e - \sigma_y + E_{tm}(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_e)}{(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^n} \\ a_2 = -\dfrac{E - E_{tm}}{n(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{n-1}} \end{cases} . \qquad (6)$$

Показник ступеня функції визначається з системи рівнянь (6).

$$\frac{\sigma_e - \sigma_y + E_{tm}(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_e)}{(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^n} = -\frac{E - E_{tm}}{n(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{n-1}} ,$$

$$n = \frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_{ym} - \varepsilon_e)} , n = \frac{(E\varepsilon_y / \sigma_y)(1 - E_{tm} / E)(1 - \varepsilon_e / \varepsilon_y)}{1 - \sigma_e / \sigma_y - (E\varepsilon_y / \sigma_y)(E_{tm} / E)(1 - \varepsilon_e / \varepsilon_y)} . \qquad (7)$$

При E_{tm}=0 раніше була отримана відповідна формула для ступеня: $n = E(\varepsilon_y - \varepsilon_e)/(\sigma_y - \sigma_e)$, що підтверджує достовірність проведених аналітичних досліджень.

Для уніфікованої діаграми розтягу сталі [1] $\varepsilon_{ym} = \varepsilon_y = 1{,}72 \times 0{,}002 = 0{,}00344$ коефіцієнт a_2 відповідно буде:

$$a_2 = -\frac{E - E_{tm}}{\dfrac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{n-1}} = -\frac{(E - E_{tm})\left[\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)\right]}{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^n}$$

$$a_2 = -\frac{\left[\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)\right]}{(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}}}. \quad (8)$$

Таким чином, функція апроксимації діаграми сталі на ділянці розвитку пластичних деформацій буде мати вигляд:

$$\sigma_i = \sigma_y - \frac{\left[\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)\right]}{(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}}}(\varepsilon_y - \varepsilon_i)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}} - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_i). \quad (9)$$

$$\sigma_i = \sigma_y\left[1 - \frac{1 - \sigma_e/\sigma_y - (E_{tm}/\sigma_y)(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}}}(\varepsilon_y - \varepsilon_i)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}} - \frac{E_{tm}}{\sigma_y}(\varepsilon_y - \varepsilon_i)\right]. \quad (10)$$

Дотичний модуль у будь-який точці розвитку пружно-пластичних деформацій за (1, б) з урахуванням залежності (10) дає відношення:

$$E_t = (E - E_{tm})\frac{(\varepsilon_y - \varepsilon_i)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)} - 1}}{(\varepsilon_y - \varepsilon_e)^{\frac{(E - E_{tm})(\varepsilon_y - \varepsilon_e)}{\sigma_y - \sigma_e - E_{tm}(\varepsilon_y - \varepsilon_e)} - 1}} + E_{tm} \quad (11, а)$$

$$\frac{E_t}{E} = \left[\left(1 - \frac{E_{tm}}{E}\right)\left(\frac{1 - \varepsilon_i/\varepsilon_y}{1 - \varepsilon_e/\varepsilon_y}\right)^{n-1} + \frac{E_{tm}}{E}\right] \quad (11, б)$$

Перевірка. За умовами $\varepsilon_i = \varepsilon_e$ маємо $\sigma_{\varepsilon_i = \varepsilon_e} = \sigma_e$, а за $\varepsilon_y = \varepsilon_i$, відповідно, напруження дорівнюють границі текучості сталі $\sigma_{\varepsilon_y = \varepsilon_i} = \sigma_y$.

Виклад основного матеріалу дослідження. На сьогодні існує декілька підходів щодо визначення стійкості центрально-стиснутих сталевих стрижнів з урахуванням пружно-пластичних деформацій. Теоретичні положення дотичного і подвійного модуля [1, 4, 6, 7–9], а також концептуальний підхід Ф. Шенлі сьогодні є основами з визначення несучої здатності центрально-стиснутих і позацентрово-стиснутих металевих стержнів.

Прийнято, що критичні напруження за дотичним модулем згідно з дослідженнями слід визначати за відомим критерієм [2, 3, 4, 6, 10–13, 15]:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{\lambda_y^2} E_t. \qquad (12)$$

З іншого боку, ці напруження повинні відповідати точці діаграми апроксимації розтягу сталі за формулою [12] (10).

$$\sigma_{cr} = \sigma_i\,. \qquad (13)$$

Для визначення коефіцієнта повздовжнього згину (φ_{yt}) центрально-стиснутого стрижня за дотичним модулем маємо наступне рівняння з урахуванням виконаних досліджень:

$$\varphi_{yt} = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \frac{\pi^2}{\lambda_y^2}\frac{E}{\sigma_y}\left[(1-\frac{E_{tm}}{E})\frac{(\varepsilon_y-\varepsilon_i)^{n-1}}{(\varepsilon_y-\varepsilon_e)^{n-1}} + \frac{E_{tm}}{E}\right]. \qquad (14)$$

У відношенні (14) значення ступеня *n* обраховують за формулою (7). Рівняння (14) показує, що кожній точці на діаграмі розтягу сталі за умовою розвитку пластичних деформацій за дотичним модулем і відповідному значенні критичних напружень центрально-стиснутого стрижня відповідає певне значення гнучкості. За фізичним змістом ця точка характеризує початок руху стрижня від однієї форми рівноваги до іншої.

Якщо прийняти, що критичним напруженням відповідає точка на діаграмі розтягу сталі за (9), тоді об'єднання двох рівнянь (9) і (14) дає рівняння визначення критичних деформацій при заданій гнучкості:

$$\frac{\pi^2}{\lambda_y^2}\frac{E}{\sigma_y}\left[(1-\frac{E_{tm}}{E})\frac{(\varepsilon_y-\varepsilon_i)^{n-1}}{(\varepsilon_y-\varepsilon_e)^{n-1}} + \frac{E_{tm}}{E}\right] = \left\{1-\left[1-\frac{\sigma_e}{\sigma_y}-\left(\frac{\varepsilon_y E_{tm}}{\sigma_y}\right)\left(1-\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_y}\right)\right]\left(\frac{1-\varepsilon_i/\varepsilon_y}{1-\varepsilon_e/\varepsilon_y}\right)^n - \left(\frac{\varepsilon_y E_{tm}}{\sigma_y}\right)\left(1-\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_y}\right)\right\}$$

Останнє рівнянні при прийнятті умови $E_{tm} = 0$ перейде до вигляду:

$$\frac{\pi^2}{\lambda_y^2}\frac{E}{\sigma_y}\left(\frac{1-\varepsilon_i/\varepsilon_y}{1-\varepsilon_e/\varepsilon_y}\right)^{n-1}=1-\left(1-\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)\left(\frac{1-\varepsilon_i/\varepsilon_y}{1-\varepsilon_e/\varepsilon_y}\right)^{n}. \qquad (15)$$

Гнучкість, за якої стрижень втрачає стійкість, пов'язана з деяким граничним значенням пружно-пластичних деформацій. Рішення останнього рівняння (15) дає значення коефіцієнта поздовжнього згину для ідеального центрально-стиснутого стрижня з урахуванням розвитку пружно-пластичних деформацій.

Розглянута втрата стійкості центрально-стиснутого стрижня симетричного перерізу при початкових недосконалостях ($e_b/i_y, \lambda_y/750$) у площині найменшої жорсткості (OX). Загальні деформації в крайніх фібрових волокнах при втраті стійкості центрально-стиснутого стрижня складаються із залишкових деформацій (ε_0) від прокатування, деформації від поздовжнього згину стрижня, а також від поздовжніх середніх деформацій.

$$\varepsilon_i = \pm\varepsilon_0 + \varepsilon_N + \varepsilon_M, \qquad (16)$$

де $\varepsilon_N = \dfrac{N}{AE_{tN}} = \dfrac{N}{AE}\beta_E$, $\beta_E = \dfrac{E}{E_{tN}}$ − середні деформації від поздовжньої сили (N) за приведеним модулем (E_{tN}); ε_0 – залишкові деформації; ε_M – деформації від згину стрижня при кривині стрижня (ρ_y) і відстані від нейтральної поздовжньої осі до фібрових волокон $x_j : \varepsilon_{Mj} = \dfrac{\Delta}{dz} \to tg\alpha = \dfrac{dz}{\rho_y} = \dfrac{\Delta}{x_j} \to \dfrac{x_j}{\rho_y} = \dfrac{\Delta}{dz}$. Максимальні деформації від згину будуть залежати від радіуса кривизни стрижня. Кривина стрижня від поздовжнього згину та переміщення (ξ) пов'язані приблизною диференціальною залежністю: $1/\rho_y = -\xi''$. Таким чином, між максимальними деформаціями і кривиною стрижня є залежність: $\varepsilon_{Mm} = \dfrac{\Delta}{dz} = \dfrac{x_m}{\rho_y}$. $\varepsilon_{Mm} = \dfrac{x_m}{\rho_y} = -\xi'' x_m$.

У залежності від напрямку розвитку пластичних деформацій та початкових недосконалостей приведена жорсткість стрижня ($E_d I_y = EI_{yd}$) з урахуванням розвитку пластичних деформацій буде визначатися за формулою [13]:

$$E_{d1}I_y = \left(E_t I_{y1} + EI_{y2}\right) \rightarrow E_{d1} = \frac{E}{I_y}\left(\frac{E_t}{E}I_{y1} + I_{y2}\right),$$

$$E_{d2}I_y = \left(EI_{y1} + E_t I_{y2}\right) \rightarrow E_{d2} = \frac{E}{I_y}\left(I_{y1} + \frac{E_t}{E}I_{y2}\right).$$

Рівняння рівноваги в перерізі розвитку пластичних деформацій при втраті стійкості буде залежати від прогину (f), початкових ексцентриситетів (e_b), і додаткового ексцентриситету (e_t) від зсуву нейтральної осі при розвитку пластичних деформацій з одного боку стрижня. Рівновага моментів зовнішніх сил і внутрішніх зусиль описується диференційним рівнянням [1]:

$$\xi'' + \frac{N}{E_d I_y}\xi = -\frac{N}{E_d I_y}\left(e_b + e_t + l/750\right). \quad (17)$$

Загальне рішення відповідного однорідного рівняння ($\xi'' + \frac{N}{E_d I_y}\xi = 0$) для шарнірно опертого стрижня приблизно буде: $\xi = f\sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \rightarrow \xi'' = -\frac{\pi^2 f}{l^2}\sin\left(\frac{\pi z}{l}\right)$. Максимальні переміщення (f) за координатою $z = l/2$ і кривизна стрижня при втраті стійкості зв’язані через другу похідну за переміщенням та кривизну зігнутого поздовжньою силою стрижня:

$$\xi''_{z=l/2} = -\frac{\pi^2 f}{l^2}\sin\left(\frac{\pi l}{2l}\right) = -\frac{\pi^2 f}{l^2}; \ \frac{1}{\rho_{yz=l/2}} = \frac{\pi^2 f}{l^2}. \quad (18)$$

Тепер, максимальні деформації крайніх фібрових волокон середнього перерізу стрижня залежать від максимальних переміщень (f): $\varepsilon_{Mm} = \frac{x_m}{\rho_y} = -\xi'' x_m$; $\varepsilon_{Mm} = \frac{\pi^2 f}{l^2}x_m$. За відношеннями (18) рівняння рівноваги стрижня (18) переходить до рівняння рівноваги, яке об’єднує зовнішній згинальний момент, приведену жорсткість стрижня, максимальні переміщення:

$$-\frac{\pi^2 f}{l^2}E_d I_y + N\left(f + e_t + l/750 + e_b\right) = 0. \quad (19)$$

Введення позначення умовної критичної сили $N_{crt} = \frac{\pi^2 E_d I_y}{l^2}$ дає з останнього рівняння (19) формулу для визначення поперечних переміщень при поздовжньому згині з урахуванням початкових ексцентриситетів і прогинів та з урахуванням розвитку пластичних деформацій $f = \frac{e_b + l/750 + e_t}{N_{crt}E_d I_y / N - 1}$. Далі зручно перейти до критичних напружень (σ_{crt}) через гнучкість стрижня $\lambda_y^2 = \frac{l^2}{i_y^2}$ та поточні напруження $\sigma_N = N/A$.

$$\sigma_{crt} = \frac{\pi^2 E_d I_y}{l^2 A} = \frac{\pi^2 E_d i_y^2}{l^2}. \quad \sigma_{crt} = \frac{\pi^2 E_d}{\lambda_y^2}. \quad f = \frac{e_b + l/750 + e_t}{\sigma_{crt}/\sigma_N - 1}. \qquad (20)$$

Приведення переміщень за відношенням (7) до радіусу інерції дає такий запис останньої формули (7):

$$\frac{f}{i_y} = \frac{e_b / i_y + \lambda_y / 750 + e_t / i_y}{\sigma_{crt}/\sigma_N - 1}. \qquad (21)$$

Загальні деформації при поздовжньому згині з урахуванням малих ексцентриситетів і пружно-пластичній роботі сталі та залишкових деформацій від прокатування при врахуванні отриманих відношень (6, 8) приймуть вигляд:

$$\varepsilon_i = \pm\varepsilon_0 + \frac{N}{AE}\frac{E}{E_{tN}} + \frac{\pi^2}{\lambda_y^2}\frac{e_b / i_y + \lambda_y / 750 + e_t / i_y}{\sigma_{crt}/\sigma_N - 1}\frac{x_m}{i_y}. \qquad (22)$$

Останнє рівняння вирішують шляхом числових досліджень кожного окремого стрижня заданого перерізу, або, приблизно прийнявши, що при максимальних пластичних деформаціях $\varepsilon_i = \varepsilon_y$ відношення напруження до розрахункового опору сталі за границею текучості прийнято за коефіцієнт поздовжнього згину при малих ексцентриситетах $\frac{N}{AR_y} = \frac{\sigma_N}{R_y} = \varphi_{yet}$, а момент опору перерізу ($W_y = I_y / x_m$) пов'язаний із зовнішнім згинальним моментом:

$$m_y = \frac{e_b x_m}{i_y^2} = \frac{e_b x_m A}{I_y} = \frac{e_b A}{W_y}. \quad \varepsilon_i = \varepsilon_0 + \varphi_{yet}\frac{R_y}{E_{tN}} + \frac{\pi^2}{\lambda_y^2}\frac{e_b / i_y + \lambda_y / 750 + e_t / i_y}{\frac{\sigma_{crt}}{\varphi_{yet} R_y} - 1} m_y \frac{i_y}{e_b}. \qquad (23)$$

Отриманий критерій стійкості (23) за деформаціями вказує на зв'язок між обмеженими поточними крайовими пластичними деформаціями сталі (ε_i), поздовжнім навантаженням при врахуванні змінного дотичного модуля і змінними геометричними характеристиками перерізу внаслідок розвитку пластичних деформацій в залежності від гнучкості стрижня. Перетворення рівняння виконано за умови: $\frac{\pi^2}{\lambda_y{}^2}\frac{E_d}{\varphi_{yet}R_y}-1\neq 0$.

$$\varphi_{yet}^2-\frac{E_{tN}}{R_y}\varphi_{yet}\left[\frac{\sigma_{crt}}{E_{tN}}+\left(\varepsilon_i\mp\varepsilon_0\right)+\frac{\pi^2}{\lambda_y^2}\left(e_b/i_y+\lambda_y/750+e_t/i_y\right)m_y\frac{i_y}{e_b}\right]+\frac{\sigma_{crt}}{R_y}\frac{E_{tN}}{R_y}\left(\varepsilon_i\mp\varepsilon_0\right)=0 \quad (24)$$

Висновки

Таким чином, об’єднання рівнянь апроксимації діаграми розтягу сталі (10, 11) на ділянці розвитку пластичних деформацій і рівнянь (17–24) відкритого перерізу при врахуванні випадкових ексцентриситетів і недосконалостей, несиметричності перерізу та залишкових напружень від прокатування відкриває можливість отримувати коефіцієнти поздовжнього згину для кожного профілю.

Література

[1] Металеві конструкції. Загальний курс / [Нілов О. О., Пермяков В. О., Шимановський О. В., Білик С. І. та ін.]. – К. : Видавництво «Сталь», 2010. – 869 с.

[2] Илюшин А. А. Пластичность / А. А. Илюшин. – Гостехиздат,1948.

[3] Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М. : Высш. шк., 1968. – 512 с.

[4] Константинов А. Ю. Экспериментально-расчетная схема определения параметров разрушения для металлов и сплавов / А. Ю. Константинов // Вестник молодых ученых «Ломоносов». Вып.III. – М. : Макс Пресс, 2007. – С. 228–232.

[5] Цурков И. С. Решение двух замечательных задач / И. С. Цурков. – М. : МИСИ, 1991. – 12 с.

[6] Рудых О. Л. Практические вопросы аппроксимации експериментальных кривых степенными и дробно-линейными функциями / О. Л. Рудых // Вестник ТГАСУ. – Хабаровск, 2010. – №1. – С. 110–122.

[7] Чувикин Г. М. Об устойчивости за пределом упругости внецентренно-сжатых тонкостенных стержней открытого профиля : Исследования по стальным конструкциям / Г. М. Чувикин. – М. : Госстройиздат, 1982. – С. 70–159.

[8] Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх. – М. : Госиздат физматлитературы, 1959. – 544 с.

[9] Белый Г. И. Приближенное решение задач деформационного расчета стержней в упругой среде / Г. И. Белый // Строительная механика сооружений / Межвузов. тематич. сб. тр. – Л. : ЛИСИ, 1981. – С. 13–22.

[10] Астахов И. В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутих профилей : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.01 / И. В. Астахов.– СПб., 2006. – 123 с.

[11] СНиП II-23-81*. Стальные конструкции.

[12] Малевич А. И. О нормативном расчете местной устойчивости центрально-сжатых тонкостенных стержней / А. И. Малевич, С. В. Ракша // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – 2003 – С. 22–27.

[13] Білик С. І. Апроксимація діаграми розтягу сталі степеневою функцією / С. І. Білик, А. С. Білик, М. В. Усенко // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. трудов МОН України. – Одеса : ОДАБУ, 2011. – №15. – Часть 3 – С. 3–9.

[14] Білик С. І. Про стійкість центрально-стиснутого гнутого швеллера з урахуванням розвитку пластичних деформацій / С. І. Білик, М. В. Усенко // Зб. наук. пр. МОН України. – Рівне : НУВГП, 2011. – Вип. 21. – С. 136–143.

[15] Бєлов І. Д. Експериментальні випробування сталевих гнутих профілів з перерізами відкритого типу / І. Д. Бєлов, С. І. Білик, М. .В Усенко, М. М. Джамбуєв // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Зб. наук. пр. МОН України. – Рівне : НУВГП, 2008. –Вип. 16. – С. 66–72.