

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ПОСИЛЕННЯ СТИСНУТИХ СТАЛЕВИХ СТРИЖНІВ

© Котів М.В., Більський М.Р., 2005

Описані основні принципи проектування поздовжньо стиснутих металевих елементів, посилюваних під навантаженням.

In this article deals with the general principles of designing longitudinal compressed metalwors, intensified under loading.

Постановка проблеми. У зв'язку з реконструкцією і модернізацією основних фондів посилення стиснутих елементів сталевих конструкцій, що експлуатуються, є на теперішній час актуальною проблемою. З метою економії металу та можливості виконувати роботи з посилення конструкцій під навантаженням необхідно вдосконалювати методики розрахунку їх напружено-деформованого стану (НДС).

Вибір схеми посилення визначається формою поперечного перерізу, гнучкістю посилюваного стрижня, умовами завантаження, величинами та ексцентриситетами прикладення стискальних сил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з умов раціональності схеми посилення є вимога збільшення згинної жорсткості посиленого перетину, при одночасному забезпеченні мінімального ексцентриситету поздовжньої сили щодо центра ваги посиленого стрижня [1]. При визначенні параметрів НДС посиленого стиснутого елемента необхідно також враховувати те, що його стійкість характеризується критичною епурою напружень у його розрахунковому поперечному перерізі. Глибина проникнення пластичних деформацій у розрахунковому перетині стиснутого стрижня залежить, як відомо, від його гнучкості й ексцентриситету дії стискаючої сили. Відомо також, що чим менша гнучкість стрижня і більший ексцентриситет нормальної сили, тим більшу частину поперечного перерізу (у критичному стані) займає зона пластичності. При посиленні стиснутих стрижнів традиційними способами збільшенням перетинів (без зменшення в них напруження) ці стрижні мають великі деформації (прогини) відразу після посилення, що суттєво знижує їх несучу здатність. Зварювання під час посилення сталевих конструкцій також впливає на їх несучу здатність через зміну напружено-деформованого стану. Ефективність напруги елементів, що додаються, зі зменшенням гнучкості посиленого, стрижня помітно знижується. Так, при умовній гнучкості $\lambda=1$, несуча здатність посиленних елементів за рахунок напруги підсилювальних стрижнів, збільшилася усього на 4–7 %. Виходить, що стрижні гнучкістю $\lambda < 1$ можна підсилювати традиційними способами, тобто без попередньої напруги [2] .

Для зменшення деформативності елементів посилення стрижнів великих гнучкостей доцільно проектувати однобічним (з додаванням металу з боку ексцентриситету стискаючої сили). При цьому допускається збільшувати зусилля попередньої напруги N_{ps} до такої величини, що дозволить максимально зменшити прогин стрижня від зовнішнього навантаження, а також частково або цілком компенсувати залишковий прогин від зварювання . В окремих випадках при такому посиленні можна домогтися того, що з врахуванням зварювального, прогин посиленого стрижня буде нульовим [2,3] .

Для зменшення працемісткості робіт під час посилення стиснуті стрижні рекомендується підсилювати мінімальною кількістю елементів.

Розробка інженерних методів розрахунку посилення сталевих конструкцій тісно пов'язана з розрахунком параметрів НДС. При посиленні позацентрово стиснутих стрижнів напружуючими розпірками одним із основних параметрів є величина зусилля напруги розпірки N_{ps} яка залежить від первісної стрілки її перегину f_p . Для посилюваних у практиці елементів величина f_p

знаходиться в межах 100–250мм, що дає можливість здійснювати контроль зусилля N_{ps} шляхом контролю розрахункової величини f_p .

Для можливості створення первісної стрілки перегину розпірки f_p в місцях майбутніх перегинів роблять вирізи полиць швелерів, або пера кутника. Наявність цих вирізів на 30–60% зменшує площу поперечного перерізу розпірок. У разі, якщо величина $N_{ps} \geq A_r R_y$ місця розрізів (перед вигином розпірок) підсилюються накладками.

Первісний вигин розпірок здійснюється на заводі-виготовлювачі, або на будівельному майданчику, в окремо відведеному для цієї мети місці, а також безпосередньо в проектному положенні перед накладанням кінцевих зварених швів. При цьому величину первісної стрілки перегину розпірки роблять трохи більшою від розрахункової. Після установки розпірки до посилюваного стрижня, відповідно до прийнятої схеми посилення, монтують стяжні хомути чи струбцини, за допомогою яких шляхом загвинчування гайок чи іншим способом домагаються розрахункової первісної стрілки перегину розпірки. Тільки після цього виконують щільне заклинювання кінців розпірки за допомогою прокладок чи клинів і накладають кінцеві зварені шви.

Елементи посилення можуть упиратися безпосередньо в ригелі рам, або у спеціальні столики. Здебільшого при посиленні розпірками столики не потрібні, тому що після створення розрахункової величини первісної стрілки перегину розпірки, накладають кінцеві зварені шви, а потім притискають стрижень, що додається, до посилюваного. З метою підвищення безпеки проведення робіт з посилення кінцеві шви можна накладати окремими ділянками в міру притиснення розпірки до посилюваного стрижня. Після щільного прилягання елемента посилення до посилюваного виконується крапкова прихватка всіх елементів по їхній довжині і накладаються сполучні зварні шви. Для удосконалення технології посилення необхідно було визначити параметри напруження елементів посилення, кількості елементів і забезпечення їх стійкості під час посилення, проектування зварних з'єднань.

Метою статті є визначення основних розрахункових параметрів посилення і обґрунтування методів розрахунку.

Проведені раніше дослідження показали, що теоретично виведені величини первісної стрілки перегину f_p не дають розрахункової величини зусилля розвантаження основного стрижня, оскільки в розпірці існують втрати зусилля її напруги N_{ps} від піддатливості кінцевих упорів і ослаблення перетину розпірки розрізами. Зазначені втрати можна врахувати шляхом збільшення первісної стрілки перегину розпірки до величини

$$f_p^k = f_p \cdot n_r \quad (1)$$

Тут n_r – коефіцієнт, що враховує втрати напруги розпірки від ослаблення її перетину розрізами, піддатливості і змінання кінцевих упорів, зазорів між опорними гранями розпірок і робочою гранню столика.

У загальному випадку коефіцієнт n_r визначається з виразу

$$n_r = \sqrt{1 + \sum \Delta / \Delta l} \quad (2)$$

де Δl – втрати від пружної піддатливості конструкції; $\sum \Delta$ – сумарні втрати.

$$\sum \Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4. \quad (3)$$

Тут Δ_1 – втрати від розрізів розпірок. У випадку дотримання умови $N_{ps} < A_r \cdot R_y$, де A_r – площа розпірки в місці розрізу $\Delta_1 = 0$. У випадку $N_{ps} \geq A_r \cdot R_y$,

$$\Delta_1 = 0,02 l_{розр.}$$

де $l_{розр.}$ – сумарна довжина ділянок розпірки, ослаблених розрізами; 0,02 – відносна довжина площадки плинності для будівельних сталей; Δ_2 – втрати від піддатливості кінцевих упорів. У разі

приварювання кінцевих упорів – $\Delta_2 = 0$; Δ_3 – втрати від зминання опорних ребер розпірок, прокладок між кінцями розпірок і упорами; – $\Delta_3 = 0,3$ мм.; Δ_4 – сумарний зазор між кінцями розпірок і опорних столиків. При щільному заклинюванні кінців розпірок прокладками і клинами – $\Delta_4 = 0$.

У практиці посилення для розпірок, кріплення кінців яких виконується за допомогою зварювання, можна приймати величину коефіцієнтів $n_r = 1,05$ (для розпірок, що мають один розріз) і $n_r = 1,1$ – для розпірок, що мають три розрізи. У разі закріплення кінців розпірок за допомогою прокладок і клинів $n_r = 1,2$.

Визначення кількості поперечних елементів. Під час притиснення посилюючих розпірок до основного стрижня, перші від сприйняття ними зусилля N_{ps} можуть утратити стійкість. Для запобігання такої втрати по довжині елементів устанавлюються хомути. Установа хомутів обов'язкова в місцях розрізів розпірок.

Кількість проміжних хомутів на ділянці від кінця розпірки до її розрізу, яка є достатньою для забезпечення стійкості розпірок, визначається за формулою

$$n_1 > \sqrt{\frac{N_{ps}}{N_{cr}^i}} - 1 \quad (4)$$

де $N_{cr} = \pi^2 EI_r / l_i^2$ – ейлерова сила для і-ї ділянки розпірки; l_i – довжина і-ї ділянки розпірки, N_{ps} – величина зусилля розвантаження елемента.

Загальна кількість хомутів на всій довжині розпірки

$$n \geq \sum n_i + 3 \quad (5)$$

Тут 3 – кількість хомутів по кінцях розпірки й у місці її розрізу.

Застосування посилюючих елементів зі сталей підвищеної і високої міцності дає можливість додатково економити метал посилення. У цьому випадку величина зусилля напруги елементів, що додаються, визначається із умови наявності в розрахунковому перерізі підсиленого елемента стрибка напружень

$$\Delta\sigma = R_y^r - R_y^0 \quad (6)$$

Розрахунок посиленних стрижнів виконується за методикою [2] із застосуванням осередненого розрахункового опору, обумовленого за формулою

$$R_y = R_y^0 \sqrt{K_A \cdot K_i}, \quad (7)$$

де

$$K_A = \alpha - A_0(\alpha - 1) / A; \quad K_i = \alpha - I_0^1(\alpha - 1) / I; \quad \alpha = \frac{R_y^r}{R_y^0}$$

R_y^0 , R_y^r – розрахункові опори розтягу, стиску основного і елементів, що додаються; I_0^1 , I – моменти інерції поперечних перерізів посилюваного і посилюючого стрижнів щодо центральної осі посиленого елемента.

Для раціонального закріплення посилюючих елементів необхідно визначити параметри напружень в місці накладання зварних швів. Після монтажу розпірок до посилюваної колони, установи хомутів і розрахункової величини стрілки її перегину, накладають кінцеві зварні шви. Довжина кінцевих швів збільшується в міру збільшення зусилля напруги (у міру притиснення розпірок до посилюваного елемента). Потім по довжині елементів накладаються сполучні зварні шви в перехресному порядку, що забезпечує мінімальні залишкові зварювальні деформації і напруги. Максимальні крайові напруження від зовнішнього навантаження в місці майбутніх швів у момент посилення не повинні перевищувати величини $\sigma \leq 0,8 R_y$. Якщо зазначене співвідношення

не виконується, то проектується передача зусилля N_{ps} через тимчасові опорні столики, установлені на високоміцних болтах, чи способом, коли кінці посилюючих елементів за допомогою спеціальних хомутів і високоміцних болтів притискаються до посилюваного стрижня. Необхідно відзначити, що тимчасові столики і притискні хомути не обов'язково повинні забезпечувати передачу усієї величини зусилля N_{ps} . Достатньо, щоб через них можна було передати ту частину зусилля N_{ps} , яка забезпечить зменшення напружень у місці накладення кінцевих зварних швів до величини $\sigma = 0,8 R_y$. Надалі накладаються кінцеві зварні шви і проводиться збільшення зусилля до розрахункової величини.

Для визначення початкового прогину стрижня перед посиленням знаходимо величину ексцентриситету нормальної сили, діючої в момент посилення щодо центрів ваги, посилюваного і посиленого стрижнів

$$e_0 = M_0/N_0 \quad e = e_0 - e_{cm}$$

Тут M_0, N_0 – згинальний момент і поздовжня сила в посилюваному елементі в момент його посилення.

Прогин основного елемента посередині його довжини перед посиленням

$$f_0 = e_0 \left[\frac{1}{\cos(0,5l\sqrt{N_0/EI_0})} - 1 \right], \quad (8)$$

де I_0 – момент інерції поперечного перерізу посилюваного стрижня відносно його центра ваги.

У випадку, якщо стрижень за результатами обстеження має прогин f_1 , більший, ніж f_0 , приймаємо, що $f_0 = f_1$.

Прогин елемента посередині після передачі зусилля N_{ps} від стрижня, що додається, на посилюваний

$$f_M = e \left[\frac{1}{\cos(0,5l\sqrt{N_0/EI})} - 1 \right] \quad (9)$$

У разі, якщо існуючий прогин стрижня $f > f_M$, а це означає, що під час посилення основний стрижень має залишковий прогин, замість e у формулі (9) варто приймати значення e^1

$$e^1 = e + f_{ocm}, \quad (10)$$

де

$$f_{ocm} = f \frac{(N_{\Delta 0} - N_0)}{N_{\Delta 0}} - \frac{N_0}{N_{\Delta 0}} e_0 \quad (11)$$

Тут f_1 заміряний прогин основного стрижня перед посиленням, $N_{\Delta 0}$ – ейлерова сила основного стрижня.

Залишковий зварювальний прогин посиленого стрижня від приєднання посилюючих елементів

$$f_w = \sum \lambda_F^i \cdot K_0^i \cdot K_w^i \cdot y_i \cdot l^2 \cdot N_{\Delta} / 8I(N_{\Delta} - N_0), \quad (12)$$

де $K_w^i = a_i/d_i$ коефіцієнт переривності i -го шпонкового шва; a_i – довжина безупинних ділянок i -го шпонкового шва; d_i – відстань між центрами безупинних ділянок i -го шва; λ_F^i – залишкові деформації від накладення i -го шва. Для суцільного шва $K_w^i = 1$.

K_0^i – коефіцієнт, що враховує рівень напружень у місці i -го шва.

$$K_0^i = 1 - \ln(1 - \xi_i) / \ln 2; \quad \xi_i = \sigma_i / R_y.$$

Тут σ_i – напруження в місці накладення i -го зварного шва.

$$\sigma_i = \frac{N_0}{A} \pm \frac{N_0 \cdot e \cdot y_i}{I} \quad (13)$$

Під час накладання швів вручну електродуговим зварюванням $\sum \lambda_F^i = 0,0035K_A^2$, при автоматичному зварюванні – $\sum \lambda_{fi}^i = 0,0025K_{fi}^2$;

Тут, K_{fi} – катет кутового звареного шва; l – розрахункова довжина посиленого стрижня; I , N_0 – момент інерції поперечного перерізу і ейлерова сила посиленого стрижня.

Перевірка стійкості позacentрово стиснутих стрижнів суцільного поперечного перерізу, посиленних елементами, що напружуються, виконується за формулою

$$N/(\varphi_e A) < R_y \gamma_c, \quad (14)$$

де коефіцієнт φ_e визначається за нормативними документами залежно від умовної гнучкості і приведенного відносного ексцентриситету m_{ef} стискаючої сили з застосуванням еквівалентного ексцентриситету e_p

$$e_p = e + K_w f_w, \quad (15)$$

де e – ексцентриситет додатка розрахункової подовжньої сили в посиленому стрижні ($e = M/N$); M , N – розрахункові значення подовжньої сили і згинаючого моменту в посиленому стрижні; f_w – залишковий зварювальний прогин посиленого стрижня; коефіцієнт $K_w = 0,5$, у випадку якщо залишковий зварювальний прогин є розвантажувальним чинником, і $K_w = 1$ – у всіх інших випадках; f_{ocm} залишковий прогин посилюваного стрижня перед посиленням.

У випадку, якщо підсилюються стиснуті елементи з залишковими деформаціями, еквівалентний ексцентриситет приймається таким, що дорівнює

$$e_p = e + K_w f_w + f_{ocm}, \quad (16)$$

де, R_y – розрахунковий опір сталі посилюваного елемента. У випадку застосування посилюючих елементів, що напружують, зі сталі підвищеної чи високої міцності замість значення R_y у формулі (14) варто приймати середнє значення

$$R_y = R_y \sqrt{K_A \cdot K_i} \quad (17)$$

де

$$K_A = \alpha - A_0(\alpha - 1) / A; \quad K_i = \alpha - I_0^1(\alpha - 1) / I; \quad \alpha = \frac{R_y^r}{R_y^0}$$

I_0^1 – момент інерції посилюваного елемента відносно центральної осі посиленого стрижня; R_y , R_y^r – розрахункові опори сталі відповідно посилюваного посилюючого елементів розтягання, стиску, згину по границі текучості.

Для одержання розрахункової величини розвантажувального зусилля N_{ps} необхідно строго витримати первісну стрілку перегину розпірки f_p . Величину f_p визначають за формулою

$$f_p = n_r \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \Delta l}{l_1 + l_2} + (b_2 - b_1)^2} \quad (18)$$

де l_1, l_2 – відстані відповідно від верхньої до середньої і від середньої до нижньої точок повороту розпірки при її напруженні.

$$\Delta l = \frac{N_{ps} \cdot l}{EA_0} + \frac{N_{ps} \cdot l}{EA_r} + \frac{2\pi}{l} (f_0 \cdot e_{ps} - f_M \cdot e_r) + \frac{\pi^2 \cdot f_0^2}{4l}, \quad (19)$$

e_{ps} – відстань від центра ваги поперечного перерізу основного стрижня до крапки передачі стискаючого зусилля, b_1, b_2 відстані від центра ваги поперечного перерізу розпірки до місця її перегину при притисненні, відповідно посередині й у кінцях розпірки.

Розрізи розпірок необхідно проектувати так, щоб виконувалася умова $b_2 \geq b_1$. У формулі (18) значення величин b_2 чи b_1 варто приймати зі знаком “плюс”, якщо щодо центра ваги розпірки відповідні крапки повороту при її притисненні розташовані убік від посилюваного елемента і зі знаком “мінус” у всіх інших випадках; n_r – коефіцієнт, що враховує втрати розпірки від ослаблення її перетину розрізами, піддатливості і змінання кінцевих упорів, $n_r = 1,05$ для розпірок, що мають один розріз, кріплення кінців яких виробляється за допомогою зварювання; $n_r = 1,1$ – то саме, але для розпірок, що мають три розрізи; $n_r = 1,2$ – у разі закріплення кінців розпірок клинами і прокладками, а також у випадку застосування тимчасових опорних столиків.

При посиленні стиснутих стрижнів напружуючими листовими елементами величину первісного вигину листа f_π перед накладанням кінцевих зварних швів розраховують за формулою

$$f_\pi = \frac{4}{\pi} \left(b_1 + \sqrt{\frac{l \cdot \Delta l}{4} + b_1^2} \right) \quad (20)$$

де величина Δl визначається з виразу (19).

У разі посилення стиснутих стрижнів елементами попередньо стиснутими затяжкам передбачається, що посилюючі елементи попередньо стискаються в заводських умовах, або в окремо відведених для цієї мети місцях, із зусиллям N_{cr} . Від вказаного зусилля ці елементи отримують прогин f_{p3} . Після закріплення кінців зарядженого в такий спосіб стрижня на посилюваному елементі знімаються тяги і посилюючі елементи притискаються до посилюваного за допомогою хомутів.

Величина контрольованого зусилля попереднього стиску елементів, що додаються, визначається з виразу [2] .

$$N_{er} = N_{ko} - \pi \cdot E \cdot A_r \cdot f_0 (0,25\pi \cdot f_{p3} - 2b_1) / l^2,$$

де

$$N_{ko} = N_{ps} + \frac{E_r \cdot A_r}{l^2} \left[\frac{N_{ps} \cdot l^2}{E_0 \cdot A_0} + \frac{\pi^2 \cdot f_0^2}{4} + 2\pi (f_0 \cdot e_{ps} - f_M \cdot e_r) \right]$$

Висновки. Визначені параметри напружено-деформованого стану стиснутих сталевих стрижнів та посилюючих елементів є вихідними даними для проектування технології виконання будівельно-монтажних робіт в умовах реконструкції каркасів металевих споруд.

Методи оцінки напружено-деформованого стану посилюваних конструкцій враховують основні технологічні фактори, що існують під час їх посилення під навантаженням і дають змогу отримувати результати, які відображають їх дійсну роботу, що позитивно впливає на вартість будівельно-монтажних робіт під час реконструкції.

1. Клименко Ф.Є., Барабаш В.М., Стороженко Л.І. Металеві конструкції. За ред. Ф.Є. Клименка: Підручник. – 2е вид. випр. і доп. – Львів. Світ, 2002. – 312 с. 2. Більський М.Р., Котів М.В. Експериментальні дослідження поздовжньо стиснутих сталевих конструкцій, посилені під навантаженням. // Теорія і практика будівництва. Вісник НУ “Львівська політехніка” № 520. –

Львів. – 2004. – С. 9–16. 3. Котів М.В., Більський М.Р. Стійкість позацентрово стиснутого стержня, підсиленого збільшенням перерізу елементом із сталі підвищеної міцності // Теорія і практика будівництва. Вісник НУ “Львівська політехніка” № 520. – Львів. – 2004. – С. 126–128.

УДК 624.21

П.М. Коваль*, Р.І. Полюга**, П.М. Сташук*, А.Є. Фаль*

*Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. Шульгіна, м. Київ,

**Національний університет “Львівська політехніка”,

кафедра будівельних конструкцій та мостів

КІНЕТИКА ВИПРОМІНЮВАННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ В БЕТОНІ ПРИ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

© Коваль П.М.*, Полюга Р.І.**, Сташук П.М.*, Фаль А.Є.*, 2005

Наведено дані про експериментальні дослідження роботи бетонних зразків на стиск в умовах малоциклових навантажень з використанням методу акустичної емісії, проведення аналізу кінетики випромінювання сигналів акустичної емісії. Описана програма, методика та результати випробувань дослідних зразків бетонних призм різної міцності та складу бетону.

In the article the information about experimental researching of behaviour of concrete specimens under stress lowcycling loads using acoustic emission method and analysis of acoustic emission kinetics is given. The program, method and results of researching of concrete specimens with various strength and contents are described.

Постановка проблеми. Всі навантаження та впливи в нормах проектування [1] поділяють на постійні і тимчасові. Існуючий поділ за тривалістю дії не відображає характер і значення цих навантажень. У реальних умовах усі тимчасові навантаження періодично повторюються, тобто мають змінний характер як за тривалістю, так і за своїм значенням [2]. Їх можна подати монотонно-змінними та циклічними. Останні своєю чергою можна розділити на малоциклові, періодичність повторення яких є декілька десятків, сотень, а деколи і тисяч циклів, і багатоциклові з періодичністю повторення більше ніж два мільйони циклів.

Аналіз останніх досліджень. Відомо, що границя малоциклової втомленості або малоциклова пристосованість стиснутого бетону $\sigma_{b,cyc}^{cr} = 0.85R_b$ [3,4]. При рівнях відносних напружень $\eta_b^{top} = \sigma_b / R > 0.85$ існує розуцільнення бетону і малоциклова втомленість (коли ширина петлі гістерезису безперервно збільшується від циклу до циклу аж до руйнування). При рівнях напружень $\eta_b^{top} = \sigma_b / R < 0.85$ настає малоциклова пристосованість бетону, відбувається ущільнення бетону із подальшою стабілізацією деформацій.

Руйнування в бетоні під час дії навантажень не відбувається миттєво – від моменту утворення дефектів і до початку її критичного зростання минає певний час. Своєчасне виявлення розвитку цих дефектів є важливим завданням, і, разом з тим, складною проблемою [5]. На сьогодні методом, що дозволяє оцінити активність дефекту і класифікувати його не за розміром, а за рівнем небезпеки для роботи конструкції, є метод акустичної емісії. Акустична емісія (АЕ) – це явище, що полягає у випромінюванні пружних хвиль у твердих тілах під час їх деформації [6,7,8,9].

Мета роботи. В НУ “Львівська політехніка” були проведені дослідження роботи бетонних та залізобетонних зразків при малоциклових навантаженнях із використанням методу АЕ.