

РОЗРАХУНОК РЕГУЛЮВАННЯ ЗУСИЛЬ У ПРОЦЕСІ ПІДСИЛЕННЯ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВИХ КАРКАСІВ

© Більський М.Р., Кінаш Р.І., 2012

Наведено результати досліджень процесу підсилення елементів сталевих каркасів, способи регулювання зусиль під навантаженням. Описано комбінований метод такого регулювання. Показано, що розрахунок раціонального значення регулюючого попереднього напруження визначається відносно найменшого значення критичної сили.

Ключові слова: сталеві каркаси, підсилення, регулювання, стиснутий елемент, експлуатаційне навантаження.

Abstract.In the article here are stated the results of steel rolles of building work research under loading, and stress regulation metods. The combined regulation metod of such regulation is dscribed.It is shown that rational value for preliminary regulative stressing defind acordingly to the least value of critical force.

Key words: steel building, strengthening, regulation, stresst element, operating loading.

Вступ. Реконструкція та підсилення сталевих каркасів будівель і споруд у сучасних умовах має особливе практичне значення. Підсилення конструкцій – це сукупність заходів, що проводять у процесі реконструкції та ремонтно-будівельних робіт, спрямованих на збільшення тримкості каркасів або окремих елементів будівель та споруд [1–2, 6–8, 11, 14–16]. Одним з основних недоліків традиційних підходів до підсилення конструкцій є необхідність значного їх розвантаження для безпечного проведення робіт та перевитрата матеріалів [4, 5]. Тому таке підсилення неефективне з економічного погляду та допустиме тільки в обмежених випадках. У зв'язку з додатковими витратами праці для ретельного припасування елементів підсилення до підсилюваних стрижнів, які мають відповідні деформації та прогини під навантаженням, знижується технологічність підсилення конструкцій, що значно впливає на собівартість реконструктивних та ремонтно-будівельних робіт загалом. Крім цього, традиційні методи підсилення передбачають значне розвантаження конструкцій, що призводить до необхідності демонтажу технологічного обладнання та інших вартісних заходів і вимагає часткової або повної зупинки виробництва промислових підприємств. Заданих недоліків традиційних методів підсилення металевих конструкцій каркасів будівель та споруд можна уникнути, застосовуючи в технологічному процесі підсилення регулювання зусиль [1, 2, 4, 5, 10, 11].

Актуальність проблеми. Найефективнішим є регулювання зусиль для підсилення стиснутих стрижнів. Втрата стійкості [3] останніх є переважно причиною аварій будівель та споруд [5] З'єднаний з підсилюваним стрижнем поперечними гнучкими однобічними зв'язками (хомутами) регулюючий елемент підсилення, що напружується, можна розглядати як стиснутий зусиллям попереднього напруження стрижень, що має в місцях розташування хомутів проміжні пружні опори (рис. 1).

Міра пружності таких опор залежить як від згинної жорсткості основного елемента (підсилюваного стрижня), так і від їх місцезорозташування за довжиною. Кількість проміжних хомутів (пружних опор) необхідно розраховувати так, щоб поряд зі стійкістю елемента підсилення в стадії його попереднього напруження забезпечувався також і заданий його рівень. Іншими словами, кількість проміжних хомутів необхідно розрахувати так, щоб у разі створення напруження (стискання) кожного з підсилювальних елементів втрати напруження були б зведені до мінімуму. Задача

зводиться до визначення такої кількості проміжних опор (хомутів), за якої критична сила регулюючого елемента підсилення була б більшою від розрахункового зусилля попереднього напруження. Для розв'язання цієї задачі важливо встановити найневигіднішу (з погляду роботи підсилюваного і підсилювального елементів) розрахункову схему. Відповідно до технології підсилення стиснутих стрижнів попередньо напруженими (стиснутими) елементами останні (після встановлення їх у проектне положення) з'єднуються стяжними хомутами, струбцинами та іншими подібними пристосуваннями, що виконують роль поперечних зв'язків [5, 9]. Вважатимемо, що поздовжньому зсуву основним і додатковим стрижнями при попередньому напруженні такі зв'язки не перешкоджають. Через малу довжину і достатність поперечного перерізу таких зв'язків їх можна вважати доволі жорсткими на розтяг. Попереднє напруження (осьове стискання) підсилювальних елементів відбуватиметься за умов роботи стиснутих стрижнів, що мають проміжні опори [13] (рис. 1).

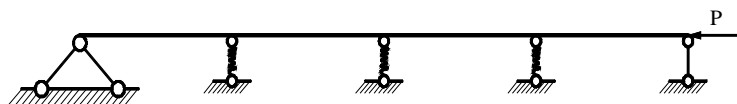


Рис. 1. Розрахункова схема елемента підсилення

Втрата стійкості (вигинання) підсилювального елемента залежить від кількості хомутів і жорсткості опор і може відбуватися за різної кількості K -напівхвиль. За малої жорсткості опор крива прогинів вигнутого стрижня може мати тільки одну півхвилю, тобто не мати точок перегину. Збільшуючи жорсткість проміжних опор, можна одержати точку перегину всередині, а потім біля кожної проміжної опори [5]. Подальше збільшення жорсткості опор не змінить кількості напівхвиль вигнутої осі стрижня. Однак такі міркування будуть цілком справедливими тільки у разі визначеного віддалення елемента, що напружується, від підсилюваного стрижня. У разі недостатнього для вільного вигинання віддалення напруженого елемента від підсиленого стрижня (зазорів між ними) характер такого вигинання через появу додаткових проміжних опор (місць додаткових контактів) буде дещо іншим.

Аналіз останніх результатів досліджень і публікацій. Дослідження роботи стиснутих стрижнів на пружних опорах розглядалися в роботах [9, 10 та ін]. Задача дослідження таких стрижнів виникла через необхідність вирішення низки питань бокового вигинання нескріплених верхніх поясів ферм сталевих мостів, а також роботи комбінованих систем. У більшості робіт [9, 10] задачі стійкості стиснутих стрижнів на пружних проміжних опорах розв'язували з урахуванням умови однакової жорсткості цих опор та інших допущень. Але це не дає можливості застосовувати їх у широкому розмінні для розв'язання задач у розглянутих нами випадках. Крім того, застосування енергетичного та інших загальних класичних методів для розв'язання задачі, подібної до поставленої нами, надзвичайно складне і трудомістке. Зі ще більшими ускладненнями пов'язане розв'язання подібних задач для стрижнів із змінною жорсткістю опор та з іншими змінними параметрами (моментом інерції, прольотами тощо) за методом Рітца. Наближені способи розв'язання, які ґрунтуються на використанні готових формул і таблиць [9, 10], можуть бути використані тільки для випадків з однією або двома опорами, оскільки вони ґрунтуються на припущенні їхньої однакової жорсткості.

Загальна методика розв'язання задачі стійкості стрижня на проміжних опорах за методом початкових параметрів, оснований на припущенні, що стрижень має ряд проміжних опор, реакції яких прямо пропорційні до значень їхніх осідань, занадто громіздке. Розв'язання поставленої задачі методом початкових параметрів ще більше ускладнюється через змінну жорсткість основи, що збільшується до кінців елемента, що напружується. Для стиснутих стрижнів на проміжних опорах з однаковими між ними відстанями і коефіцієнтами опору є такі значення цього коефіцієнта, за яких осідання опор практично дорівнюють нулю. Це значення коефіцієнта опору в нашому випадку буде доволі точним для стрижнів з однією і двома проміжними опорами, тобто для двох і трьох прольотів. Наведемо таке значення коефіцієнта опору [9]:

$$K_0 = \alpha p^2 EI / l^3, \quad (1)$$

де l – відстань між опорами; EI – згинана жорсткість стрижня; α – табличний коефіцієнт, даний в [9].

Варто зазначити, що для двох і трьох прольотів він буде дорівнювати їхній кількості, тобто 2 і 3. Для більшої кількості опор точність буде зменшуватися у бік запасу.

Мета роботи і задачі досліджень. Метою роботи є визначення опору підсилюваного елемента в технологічному процесі регулювання зусиль та розрахунок величини попереднього напруження, що має практичне значення, оскільки за меншого чи близького до обчисленого параметра пружна лінія при вигинанні стрижня має нульові точки над опорами. Для досягнення цієї мети було розроблено методологію розв'язання задач стійкості багатопрогонових стиснутих стрижнів на пружних проміжних опорах для розрахунку підсилювальних елементів при їхньому попередньому напруженні (стисканні) у проектному положенні та встановлення параметрів зв'язку між основним і підсилювальним стрижнями.

Роботу багатопрогонових стиснутих стрижнів на пружних опорах краще досліджувати числовим методом [12], що має переваги перед класичними. Матричне числення робить його зручним для розрахунків. Досліджують стійкість за цим методом за принципом малих збурювань, за яких викликаний цими збурюваннями новий вид рівноваги стане однаково можливим, як і попередній, а сили, що діють на елемент, будуть шуканими критичними. Визначення цих сил чи їхніх критичних параметрів, що призводять до втрати стійкості системи загалом чи окремих її елементів, становить кількісне розв'язання задачі прямим шляхом. Метод дає змогу замінити складну задачу розв'язання характеристичних рівнянь стійкості простою алгебраїчною задачею, у якій не міститься трансцендентних функцій. Цей метод має ще і велику перевагу перед іншими відомими методами визначення стійкості багатопрогонових стиснутих елементів на пружних опорах, у яких багато обмежень, що мають практичний зміст, зокрема однакову жорсткість проміжних опор. Обмеження не накладаються і на форму деформації. Це велика перевага запропонованого методу перед енергетичним. Збурювання системи (стиснутого стрижня з підсиленням) можна задавати довільним можливим зміщенням δ визначеної довільної кількості “ n ” перерізів. Значення зміщень до кінця розв'язання задачі можуть залишатися довільними. Точність розв'язання задачі залежатиме від того, скільком точкам (1, 2, ... n) відповідають задані збурювання. Однак точність буде достатньою і за обмеженої (малої) кількості точок n . Для розв'язання задачі необхідно скласти рівняння стійкості.

Алгоритм розв'язку задачі. Розглянемо узагальнену пружну систему, навантажену групою зовнішніх сил, заданих деяким параметром β . Задамо цій системі в довільних її точках ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) малі відхилення від положення рівноваги з ординатами $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ (малі збурювання). Задані збурювання можна записати у вигляді матриці-стовпця [12].

У результаті додаткових відхилень, спричинених збурюваннями в розглянутій пружній системі, виникають додаткові зовнішні сили (реакції опор):

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Задана група зовнішніх сил (навантаження) створює відносно точок i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) моменти:

$$Mb = bAd, \quad (3)$$

де A – числова дійсна матриця, що залежить від типу системи та способу її навантаження.

Своєю чергою, реактивні зовнішні сили R створюють згинальні моменти щодо тих самих точок, які визначають так:

$$M_R = L_m R, \quad (4)$$

де L_m – матриця, складена з ординат ліній впливу моментів (матриця впливу моментів).

$$\vec{W} = \frac{S_0}{6} B_1 \left(\frac{\vec{M}}{EI} \right) \quad (15)$$

де $M/EI = qx$ – ординати пружного навантаження у точках 1, 2, 3, ..., n.

$$B_1 = \begin{pmatrix} 41 & & & & \\ & 141 & & & \\ & & 141 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & 14 \end{pmatrix}, \quad (15a)$$

де B_1 – модульована матриця Якобі.

Тоді для переміщень одержимо:

$$\vec{y} = \frac{S}{EI} B^{(4,1)}(\vec{M}). \quad (16)$$

Якщо потрібна підвищена точність у визначенні переміщень, то криволінійну епюру моментів на кожних двох суміжних ділянках ($n-1, n, n+1$) можна подати епюрою, викресленою за квадратною параболою так, щоб вона пройшла через три суміжні точки епюри моментів (рис. 2).

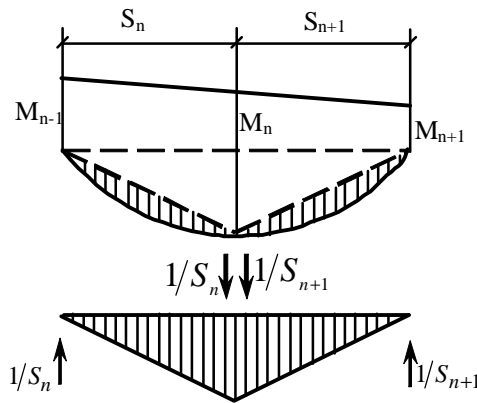


Рис. 2. До розрахунку стиснутого стрижня на проміжних пружних опорах методом пружних вантажів

Точніше значення \vec{y} у такому випадку запишемо:

$$\vec{y} = \frac{S}{6EI} B(\vec{M}). \quad (17)$$

З огляду на те, що за однакових погонних жорсткостей: $B = B^{(4,1)} = 5B^{1,1/10}(\vec{M})$, можна записати:

$$\vec{y} = \frac{5S}{6EI} B^{(1,1/10)}(\vec{M}), \quad (18)$$

$$\text{де } B^{1,1/10} = \begin{pmatrix} 1 & 0,1 & & & \\ & 0,1 & 1 & 0,1 & \\ & & 0,1 & 10,1 & \\ & & & \dots & \\ & & & & 0,11 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Детальне виведення формули (18) див. у [12].

Повертаючись до (15) і підставивши в неї значення з (7), одержимо:

$$\vec{W} = \frac{S}{6EI} [bB_1 A_d + B_1 L_M \Pi_d]. \quad (20)$$

За допомогою матриці впливу моментів L_M можна визначити:

$$d = L_M W \frac{S}{6WI} [bL_M BA_d + B_1 L_M \Pi_d]. \quad (21)$$

Ввівши позначення $C = L_M BA$; $D = L_M B\Pi$; $a = \frac{S}{6EI}$, можна записати $e = abCe + aDe$:

$$bCe = \left(\frac{1}{a} E - D \right) e. \quad (22)$$

Після спрощення (22) одержимо:

$$\left(C_0 - \frac{1}{b} E \right) e = 0, \quad (23)$$

де $C_0 = C[1/aE - D]^{-1}$,

Аналізуючи вираз (23), бачимо, що критичний стан системи настане, якщо $e \neq 0$. Тоді:

$$\left| C_0 - \frac{1}{b} E = 0 \right|. \quad (24)$$

Вираз (24) відомий за назвою вікового рівняння і є рівнянням стійкості. Рівняння (24) можливе тоді, коли $1/b$ набудатиме значення характеристичних чисел матриці $C_0 : I_1 \mathbf{f} I_2 \mathbf{f} \dots \mathbf{f} I_n$.

Їм відповідатимуть критичні параметри: $(1/b_1)_{kp}, (1/b_2)_{kp}, \dots, (1/b_n)_{kp}$.

Розв'язання задачі у кінцевому підсумку зводиться до визначення найменшого значення критичних сил (або їхніх критичних параметрів). Як видно з рівності $R_i = 1/\beta_i$, значенню $b_{kp, \min}$ відповідає значення λ_{\max} . Відповідно, розв'язання задачі зводиться до встановлення найбільшого характеристичного числа матриці C_0 , що являє собою критичний стан. Визначення λ_{\max} розглянуте у [12]. В окремому випадку, коли реактивні зусилля дорівнюють нулю (матриця D – ненульова), рівняння (24) після перетворення матиме вигляд:

$$|C - IE| = 0, \quad (25)$$

де $\lambda = 1/\alpha\beta$.

Звідки: $b_{kp} = \frac{6EI_0}{SI_{\max}}$.

У рівнянні (25) матрицю C одержують як добуток трьох матриць:

$$C = L_M BA. \quad (26)$$

Як видно, розглянутий метод має істотні переваги. По-перше, у розв'язанні не застосовують тригонометричних функцій, по-друге, усе розв'язання зводиться до знаходження найбільшого характеристичного числа матриці. Крім того, найбільш трудомістка та громізка частина традиційного розв'язання – розкриття детермінанта стійкості і відшукування критичного параметра шляхом підбору – замінюється розв'язанням прямої алгебраїчної задачі [12].

Приклад. Розглянемо стрижень постійного перерізу (рис. 3). Точність розв'язання залежить від того, якою кількістю точок (1, 2, 3, ..., n) задано відхилення (збурювання).

Візьмемо одну точку посередині прольоту $S = l/2$.

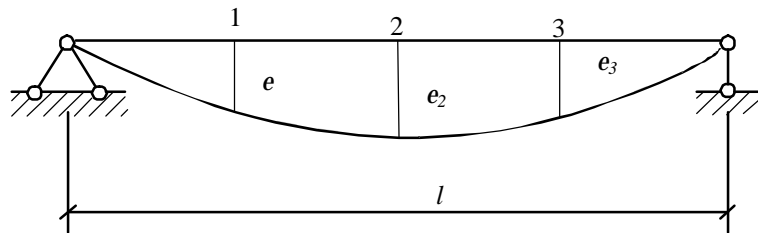


Рис. 3. Розрахункова схема стрижня

Всі матриці є матрицями першого порядку:

$$L_M = \|l/4\|; B = \|5\|; A = \|1\|.$$

Отже:

$$C = L_M B A \|5l/4\| i I_{max} = 5l/4;$$

$$P_{kp} = \frac{6EI}{SI_{max}} = \frac{9,6EI}{l^2}; \text{ (замість } \frac{9,87EI}{l^2} \text{)}$$

Як видно, різниця менша ніж 3%. Якщо задати збурювання трьом точкам (1,2,3):

$$e = \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{Bmatrix},$$

$$\text{то } S = 0,25l i P_{kp} = \frac{6EI}{SI_{max}} = \frac{24EI}{LI_{max}};$$

$L_M = (1/16)l_3$; матриця пружних вантажів $B = 5B_3$; $B_3^{1,1/10}$ модульована матриця Якобі третього порядку модуля (1,1/10):

$$A = E; C = \frac{5l}{16} l_3 h_3^{(1,1/10)} = \frac{5l}{16} [1,2l_3 - 0,4E]; I_{max} = \frac{5l}{16} [1,2l_{3max} - 0,4].$$

Але оскільки $l_{3max} = 6,83$, то $I_{max} = 2,436l$.

$$\text{Тоді критична сила } P_{kp} = \frac{24EI}{l^2 2,439} = \frac{9,85EI}{l^2}.$$

Розбіжність з точним розв'язком становить – 0,2 %.

Роботу елемента підсилення, що напружується у проектному положенні, можна досліджувати з достатньою для визначення кількості хомутів точністю, як для стиснутого стрижня на пружній основі. У розглянутому випадку пружною основою є підсилюваний стрижень, що піддається поперечному навантаженню у вигляді зосереджених сил у місцях встановлення хомутів і у місцях його вигину у бік елемента підсилення. Внаслідок того, що в період попереднього напруження між основним стрижнем і підсилювальним елементом залишаються зазори (внаслідок нещільності їхнього притиснення хомутами, або початкової кривини), а дія хомутів є однобічною, то вигинання елемента, що напружується, відбуватиметься за мінімально можливої кількості напівхвиль. Отже, на одну напівхвилю припадатиме максимальна кількість опор. Пружність проміжних опор, які розміщені на однаковій відстані від середини елемента, що напружується, вважатимемо однаковою. Коефіцієнтом пружності a (ступенем жорсткості) окремої опори прийнято вважати реакцію, що виникає в ній за одиничного її зсуву в напрямку, перпендикулярному до осі стрижня. Загальна жорсткість усіх проміжних опор може приблизно становити:

$$\sum a = ka_1 n, \quad (27)$$

де a_1 – жорсткість найпіддатливішої опори; n – кількість проміжних опор; $k=1,5, \dots, 2$ – відповідно для шарнірних і жорстких опор.

Дію таких рівновіддалених одна від іншої пружних опор можна замінити дією еквівалентного пружного середовища [10]. Коефіцієнт жорсткості такого середовища можна подати співвідношенням:

$$b = \sum a / l_k, \quad (28)$$

де l_n – відстань між проміжними опорами (хомутами).

Критичну силу елемента підсилення у такому разі можна визначити за [10]:

$$P_{kp} = \frac{p^2 EI}{l^2} \left(k^2 + \frac{bl^4}{k^2 p^4 EI} \right), \quad (29)$$

де k – кількість напівхвиль вигнутого елемента, що напружується (підсилювального); EI , l – згинна жорсткість і довжина елемента.

Прийнявши значення жорсткості пружного середовища b мінімальною, знайдемо те мінімальне значення критичної сили, за якого втрата стійкості стиснутого стрижня рівноможлива за двома суміжними формами, тобто як з кількістю напівхвиль k , так і з кількістю $k - 1$.

Знайдемо це мінімальне значення критичної сили, підставивши в (29) кількість напівхвиль $(k-1)$:

$$P_{kp}^{k-1} = \frac{P^2 EI}{l^2} \left[(k-1)^2 + \frac{bl^4}{(k-1)^2 P^4 EI} \right]. \quad (30)$$

Якщо втрата стійкості за кількості хвиль $(k - 1)$ і k рівноможлива, то можна записати рівняння $P_{kp}^{k-1} = P_{kp}^{k/n}$, тобто:

$$\frac{P^2 EI}{l^2} \left[(k-1)^2 + \frac{bl^4}{(k-1)^2 P^4 EI} \right] = \frac{P^2 EI}{l^2} \left(k^2 + \frac{bl^4}{k^2 P^4 EI} \right).$$

яке після спрощення набуде вигляду:

$$\frac{bl^4}{P^4 EI} = K^2 (K - 1)^2. \quad (31)$$

З цього рівняння можна визначити β :

$$b = \frac{k^2 (k-1)^2 P^4 EI}{l^4}. \quad (32)$$

Підставивши це значення β у рівняння (30), одержимо:

$$P = \frac{P^2 EI}{l^2} (2k^2 - 2k + 1),$$

$$\text{або } P_{kp} = P_E (2k^2 - 2k + 1), \quad (33)$$

де P_E – критична сила Ейлера еквівалентного стиснутого (напруженого) елемента, що не має проміжних опор.

Підставивши в ліву частину рівняння (33) значення розрахункового зусилля попереднього напруження $N_y \leq P_{кр.}$, одержимо формулу для визначення мінімальної кількості напівхвиль під час вигинання елемента, який напружують:

$$2k^2 - 2k + 1 = \frac{N_y}{P_E}. \quad (34)$$

Початок вигинання елемента, що напружується, відбувається, як правило, за наявності між ним і підсилюваним стрижнем великих початкових зазорів через початкову кривину останнього і нещільне затягування хомутів. У результаті кількість напівхвиль під час вигинання буде мінімальною, а точки перегину елемента, що напружують, найімовірніше, будуть розміщені в місцях тих проміжних опор, де встановлені хомути. У місцях максимальної стрілки вигинання у бік підсилюваного стрижня буде створюватися начебто додаткова проміжна опора з підсилюваного стрижня. Отже, кожна напівхвиля вигинання у бік підсилюваного елемента матиме три пружні опори. Середня опора починає працювати пізніше, ніж дві крайні (хомути), тобто після збільшення стрілки вигинання. Тому реакція, яка виникає в середній проміжній опорі, буде незначною. Напрямок її протилежний до напрямку реакцій, що виникають у місцях встановлення хомутів. Кількість проміжних хомутів, що дорівнює як кількості точок перегину, так і кількості напівхвиль, можна визначити, прийнявши $k=n$ за (30). Якщо число k (n), визначене за (34), не буде цілим, тоді необхідно округлити його у більший бік. Усі розрахунки за (34) підтверджено експериментально. Ця формула була запропонована для практичних розрахунків [5] і сьогодні використовується для проектування підсилення стиснутих стрижнів. Метод попереднього напруження застосовується,

якщо підсилення елементами, що напружуються за допомогою осьових зтягувань, неефективне. Цей випадок можливий у разі податливості, великих прогинів підсилюваної конструкції чи її елементів, вузлів передавання зусилля попереднього (розвантажувального) напруження на підсилювані конструкції або їхні елементи. Сутність комбінованого методу полягає у тому, що попередньо напружений за допомогою зтягування (зтягувань) елемент підсилення набуває поздовжнього вигину, тобто має заздалегідь розрахований початковий прогин. У такому стані підсилювальний елемент встановлюється у проектне положення і кріпиться по кінцях до підсилюваної конструкції за допомогою зварних швів, що наварюються в міру розвантаження останньої, тобто відпускання контрольованого зусилля попереднього напруження. Остання операція виконується в два етапи. Перший етап – ослаблення (чи розріз) і зняття зтягування (зтягувань). Другий етап – щільне притиснення вигнутого елемента підсилення за допомогою хомутів (струбцин) до підсилюваної конструкції. Залежно від попереднього вигину елемента підсилення, можна одержати різне розвантаження підсилюваної конструкції з урахуванням усіх втрат (від її податливості тощо). Під час підсилення позacentрового стиснутого шарнірно опертого стрижня матимемо три види втрат попереднього напруження: від осьового подовження підсилюваного елемента (Δl_0), зменшення стрілки його прогину (Δl_f) і кутів повороту, перерізів у місцях кінцевих кріплень елемента посилення (Δl_ϕ).

Ці втрати можуть бути компенсовані тільки збільшенням довжини підсилювальних елементів на:

$$\Delta l = \Delta l_0 + \Delta l_f + \Delta l_j. \quad (35)$$

Тоді величина сумарного контрольованого зусилля попереднього напруження матиме такий вигляд:

$$\sum N_k = N_{ps,\Delta l} + N_{ps,f} + \left[\frac{N_{ps,\Delta l} + N_{ps,f}}{E_0 A_0} + \frac{p^2}{4} f_0^2 - \left(\frac{p^2}{4} f_r^2 - 2b \right) + 2p(f_0 l_{ps} - f_M l_r) \frac{E_r A_r}{l^2} \right], \quad (36)$$

де $N_{ps,\Delta l}, N_{ps,f}$ – величини зусиль, що розвантажують, відповідно від відпускання зусилля попереднього напруження (стискання з поздовжнім вигином) елемента підсилення і його подальшого притиснення до підсилюваного стрижня; $E_0 A_0, E_r A_r$ відповідно осьові жорсткості і довжина посилюваного і додаткового елементів; f_0 – початковий прогин стрижня перед його підсиленням; f_r – величина зменшення початкового прогину підсилювального стрижня після його розвантаження у результаті зняття зтяжки і притиснення до нього елемента підсилення; f_ϕ – стрілка прогину елемента підсилення; b – відстань від центра ваги кінцевого перерізу елемента, підсилення до точки передавання зусилля, що розвантажує, на підсилюваний стрижень; l_{ps}, l_r – відстані від центра ваги кінцевого перерізу основного (підсилюваного) елемента, відповідно до точки передавання зусилля, що розвантажує, і до центра ваги перерізу, що додається.

Практично у розглянутому випадку за великих f_0 і l_r максимальне контрольоване зусилля попереднього напруження може в 2 – 3 рази перевищувати необхідне розвантаження.

Висновки. Перевірка стійкості підсилювального елемента у процесі регулювання зусиль дає можливість визначити оптимальну величину попереднього напруження для підсилення стиснутих стрижнів.

Раціональне значення попереднього напруження визначають відносно найменшого значення критичної сили.

Розв'язок поставленої задачі зводиться до встановлення найбільшого характеристичного числа матриці, що визначає собою критичний стан підсилювального стрижня.

Запропоновано комбінований метод поетапного регулювання зусиль, сутність якого полягає у тому, що у результаті попереднього напруження (регулюючого зусилля) за допомогою зтягування елемента підсилення останній отримує поздовжній вигин і кріпиться у проектному положенні до підсилювальної конструкції за допомогою кінцевих швів, що накладаються поетапно у міру

збільшення контрольованого зусилля попереднього напруження. Натупний етап – щільне притиснення елемента підсилення за допомогою хомутів і приєднання його до основного стрижня.

1. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель та споруд. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2008. – 106 с. 2. Більський М.Р. Кінаш Р.І. Перспективне підсилення сталевих каркасів. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2011. – С 22–25. 3. Бельский Г. Е. Совершенствование практического метода расчета сжатых стальных стержней на устойчивость // *Металлические конструкции и испытание сооружений*: Сб. тр. Л.:ЛИСИ, 1986. – С. 19–31. 4. Бельский М. Р. Усиление сжатых стержней с полным регулированием их прогибов под эксплуатационной нагрузкой // *Резервы прогресса в архитектуре, строительстве*: Вестник Льв. политехн. ин-та. 1982. – № 166. – С. 9 – 11. 5. Бельский М. Р. Усиление сжатых стержней стальных конструкций под эксплуатационной нагрузкой. – М.: Стройиздат, 1984. – 152 с. 6. Варианты типовых решений по усилению металлических каркасов одноэтажных производственных зданий (фермы). Альбом № 2: Методы и примеры расчета усиления ферм покрытия при реконструкции / Новокузнецк: СибПСК, 1985. Вып. 2. – 61 с. 7. СНиП П - 23 - 81. Раздел 20. Дополнительные требования по проектированию конструкций зданий и сооружений при реконструкции // *Бюлетень строительной техники*. – М., 1986. – № 7. 8. Варианты типовых решений по усилению металлических каркасов одноэтажных производственных зданий // *Колонны*. Альбом № 1: Технические решения по устранению дефектов и усилению стальных колонн одноэтажных промзданий / Днепрпетровск: ДнепрПСК, 1985. – 40 с. 9. Бельский М. Р., Мантюк Е. В. Устойчивость предварительно напряженных элементов усиления сжатых стальных стержней // *Резервы прогресса в архитектуре и строительстве*: Вестник Льв. политех. ин-та. – 1980. – № 145. – С. 8 – 10. 10. Бельский М. Р., Котив М. В. Экспериментальные исследования работы сжатых стальных стержней, усиливаемых методом предварительного напряжения // *Резервы прогресса в архитектуре и строительстве*: Вестник Льв. политехн. ин-та. – 1988. – № 223. – С. 5–7. 11. Инструкция по технологии усиления металлических конструкций на реконструируемых предприятиях / НИИСП. – К., 1986. – 62 с. 12. Смирнов А. С., Александров А. В., Лащенко Б. Я., Шапошников И. Н. *Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений*. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с. 13. Georgi, W. Ginersen G. *Grundlagtn fur die Reconstruction von Stahltrahwerken* // *Baupl. – Bautechn.*, - 39(1985) 6, S.211-214. 14. Kruher, R., Reitzel, W. *Reconstruction oles Fernsehkolbenwerkes Friedrichshein fur die Behalterglas production* // *Baupl. – Bautechn.*, - 40(1986) 11, S. 486-490. 15. Murkowski, W. *Exsperimentalle Traglast-unter suchungen von exzentrish belastehen Stahlstutzen, die im belastungszustand verstarakt warden* // *Stahlban*. 1985. N° 2. S. 52-54. 16. Raboldt, K., Wolf, H.-U., Ast., M., *Erhogung der Tragfahigkeit stahlerner Druckstaben durch seitliche Abstutzung unter Belastung* // *Baupl. – Bautechn.*, - 37 Ig. – Heft 1., 1983.