

ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ПІДСИЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ БАЛОК І ПРОГОНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРУЖНОЇ ОПОРИ В ПРОЛЬОТІ

Олександр ГЛІТІН¹, Сергій БІЛИК², Сергій РАДЕЦЬКИЙ³,
Олег СОНЬКО⁴, Олексій КРАВЧЕНКО⁵

^{1,2,3,4} Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

¹ glitin@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-1697-6473>

² vartist@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8783-5892>

³ s.radetskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5798-1987>

⁴ sonkooleg@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3604-8316>

⁵ alexa_kravchenko@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0007-8171-2921>

Анотація. Робота присвячена розробці теоретичних підходів до підсилення згинальних елементів, таких як балки та прогони, за допомогою встановлення пружної опори в середині прольоту, де діє максимальний згинальний момент та розробці практичної методики розрахунку такого підсилення. Необхідність підсилення може виникнути за різних умов. Основні з яких, це з довготривала експлуатація за межами свого проектного ресурсу, збільшення корисного навантаження на існуючому об'єкті, зношення конструкцій, пошкодження конструкцій в результаті додаткових епізодичних навантажень (землетруси, вибухи, тощо).

Метою роботи є надати практичний метод підсилення прогонів і балок із застосуванням пружної опори у прольоті для підвищення несучої здатності конструкцій при збільшенні навантаження (встановлення Сонячної електричної станції на покриття чи іншого додаткового обладнання) або пошкодження зумовлених вибухами чи іншими епізодичними навантаженнями, що спричинили зменшення геометричних характеристик перерізу і потребують швидкого підсилення.

Запропонувати методику розрахунку такого підсилення, що усуває недоліки існуючої науково-технічної літератури та сприяє широкому впровадженню методу для підвищення надійності конструкцій. Таке рішення не вимагає застосування зварювання чи порушення цілісності конструкції.



Олександр ГЛІТІН

доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Сергій БІЛИК

завідувач кафедри металевих та дерев'яних конструкцій,
д.т.н., професор



Сергій РАДЕЦЬКИЙ

аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій



Олег СОНЬКО

аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій



Олексій КРАВЧЕНКО

аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

А для створення попереднього напруження передбачено технологічний зазор, який закривається під час затягування болтів. Основні переваги – мінімальне втручання, створення попереднього напруження та підвищення надійності конструкції. Стаття містить розрахункову методику для такого методу підсилення, що сприятиме його впровадженню в практику для підвищення ефективності та надійності конструкцій.

Запропонований метод підсилення показаний на прикладі сталевих конструкцій, але при необхідності може бути інтерпольований і на конструкції з інших матеріалів, таких як дерев'яні чи залізобетонні.

Ключові слова: епізодичні навантаження; вибухові впливи; аварійні навантаження; аварійні конструкції; підсилення; металеві конструкції.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Необхідність підсилення будівельних конструкцій виникає в таких випадках, як зміна навантажень (Рис. 1), фізичне зношення та пошкодження, проєктні недоліки



Рис. 1. Каркасна будівля з прогонами на покрівлі якої планується збільшення навантаження шляхом встановлення Сонячної електричної станції.

Автор фото Сергій Радецький

Fig. 1. A frame building with purlins on the roof, where an increase in load is planned by installing a solar power plant Photo by Serhii Radetskyi

або помилки, зміна призначення будівлі, аварійні ситуації, покращення сейсмостійкості, невідповідність сучасним будівельним нормам, тощо.

Підсилення конструкцій забезпечує довговічність, безпеку експлуатації та стійкість будівлі до нових умов і навантажень.

В теперішній час, досить часто виникає необхідність швидко відновити виробництво на підприємствах пошкоджених внаслідок прямого влучання боєприпасів (Рис. 2): або вибухової хвилі від них.

Вибухи мають значний вплив на огорожувальні конструкції будівель та споруд. Вибухова хвиля генерує різкі перепади тиску, що створюють сильні ударні навантаження.

Основні аспекти впливу вибуху на конструкції (Рис. 3).

Руйнування від ударної хвилі – вибухова хвиля діє миттєво і з високою інтенсивністю. Перший вплив припадає на зовнішні стіни, вікна, двері та фасади, що може призвести до їх повного або часткового руйнування.

Вібраційні навантаження – при вибуху виникає сильна вібрація, яка передається на всі елементи конструкції.

Деформація і зсуви конструкцій – під впливом вибуху несучі елементи, такі як колони, балки, плити перекриття, прогоны можуть отримати пластичні деформації або зсуви, що негативно впливає на стійкість будівлі. У крайніх випадках це може спричинити частковий або повний обвал споруди.

Утворення вторинних уламків – уламки матеріалів під дією вибуху розлітаються на великій швидкості, що створює додаткову загрозу для людей і здатне викликати подальші пошкодження інших елементів будівлі.

Зниження вогнестійкості – вибух може пошкодити захисні покриття вогнетривких матеріалів на сталевих та залізобетонних елементах. Це значно знижує їхню вогнестійкість і робить конструкцію більш вразливою до подальших ризиків пожежі.



Рис. 2. Пошкодження сталевих конструкцій внаслідок прямого влучання боєприпасу. Автор фото Олександр Глітін

Fig. 2. Damage to steel structures caused by a direct hit from a projectile. Photo by Oleksandr Glitin



Рис. 3. Конструкції будівлі пошкоджені різними аспектами вибухових впливів. Автор фото Олександр Глітін

Fig. 3. Building structures damaged by various aspects of explosive impacts. Photo by Oleksandr Glitin

Порушення інженерних мереж – вибухова хвиля може пошкодити або зруйнувати інженерні мережі (електропостачання, газопостачання, водопровід), що розташовані всередині або поблизу огорожувальних конструкцій. Це часто спричиняє додаткові аварійні ситуації, такі як пожежі або затоплення.

Фундаменти та основа споруди – сильні вибухи можуть спричинити осідання або зміщення фундаменту через порушення структури ґрунтів, особливо якщо вибух відбувається на малій відстані від споруди.

Пошкодження огорожувальних конструкцій залежать від таких факторів, як відстань до епіцентру вибуху, потужність вибуху, матеріали конструкції та особливості її проектування. Для зменшення ризиків інженери розробляють спеціальні захисні конструкції та методи підсилення, що допомагають будівлям витримувати такі надзвичайні ситуації.

Підсиленням прогонів і балок шляхом улаштування двох пружних опор в прольоті наведено в праці [1]. Підсилення конструкцій з різних матеріалів наведено в працях [2-

5]. Інколи, при підсиленні конструкцій застосовуються методи оптимального проектування [6-9]

Підсилення будівельних конструкцій виконується на основі обстеження та оцінки технічного стану будівельних конструкцій, будівель і споруд [10-20]. Та регламентується будівельними нормами [20-26].

МЕТА РОБОТИ

Надати метод підсилення прогонів і балок із застосуванням пружної опори у прольоті для підвищення несучої здатності конструкцій при збільшенні навантаження (встановлення Сонячної електричної станції на покриття чи іншого додаткового обладнання) або пошкодженнях зумовлених вибухами чи іншими епізодичними навантаженнями. Запропонувати методику розрахунку такого підсилення, що усуває недоліки існуючої науково-технічної літератури та сприяє широкому впровадженню методу для підвищення надійності конструкцій

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

У практиці підсилення будівельних конструкцій використовують рішення з підсилення прогонів і балок шляхом облаштування пружної опори посередині прольоту. Опору встановлюють під підсилюваним елементом за допомогою підпруги, закріпленої на столик у центрі прольоту. Кінці підпруги притискають до підсилюваного елемента за допомогою болтів і додаткових деталей. Таке конструктивне рішення наведено в нормах проектування [21].

Це рішення не вимагає застосування зварювання чи порушення цілісності конструкції. Для створення попереднього напруження передбачено зазор Δ на кінцях підпруг, який закривається під час затягування болтів.

Пропонується виконувати розрахунок підсилення конструкцій за наведеними нижче етапами.

1. Визначають відстань від опори прогону до вузла з'єднання з підсилювальним елементом, на якій момент від граничного

навантаження q дорівнює несучій здатності прогону

$$a = \frac{l}{2} - \sqrt{\frac{l^2}{4} - \frac{2R_y \gamma_c W_x}{q \gamma_n}} \quad (1)$$

2. Визначають мінімальну розвантажувальну силу F , при якій забезпечується міцність в будь-якому перерізі на підсиленій ділянці прогону. Цей розрахунок можна виконувати шляхом поступового наближення:

а) в першому наближенні визначають силу F' , яка потрібна для забезпечення міцності на середині довжини прогону, та відстань X'_M від лівої опори до перерізу, в якому виникає максимальний момент від навантаження q і сили F' :

$$F' = \frac{1}{l - 2a} \left(\frac{ql^2}{2} - \frac{4R_y \gamma_c W_x}{\gamma_n} \right) \quad (2)$$

$$M_x = \frac{qx(l-x)}{2} - \frac{F}{2}(x-a)$$

зрівнюючи похідну і нуль $M'_x = 0$ дістають

$$X'_M = \frac{l}{2} - \frac{F'}{2q} \quad (3)$$

б) у другому наближенні визначають силу F'' , при якій на відстані X'_M від опори виникає момент, рівний несучій здатності прогону, та відстань X''_M від опори до перерізу, в якому діє максимальний момент від q і сили F'' :

$$F'' = \frac{1}{\gamma_n(X'_M - a)} \times [qX'_M(l - X'_M)\gamma_n - 2R_y \gamma_c W_x]; \quad (4)$$

$$X''_M = \frac{l}{2} - \frac{F''}{2q}. \quad (5)$$

Наступні наближення виконують аналогічно другому наближенню і закінчують ітерацію коли в двох наближеннях виходять значення сили F приблизно однаковими або

значення X_M виходить меншим ніж a . За розрахункове значення сили F беруть середнє за двома останніми наближеннями.

Потрібне значення сили F можна визначити без виконання поступового наближення, якщо використати вираз для X_M в останньому наближенні при $X_M = a$. При цій умові F обчислюють за формулою:

3. Підбирають поперечний переріз підсилювального елемента при дії сили F .

$$F = ql_r \quad (6)$$

4. Визначають реакцію пружної опори $R_{пр}$ із умови рівності прогинів підсилювального елемента від сили $R_{пр}$ і прогону в середині прольоту від навантаження q_s (враховуючи прогин у вузлі від регулювання зусиль) і сили $R_{пр}$

$$R_{пр} = 2q_s \times \quad (7)$$

$$\times \left(\frac{5}{16} l^4 - al^3 + 2a^3 l - a^4 \right) \times \frac{I_{x,r}}{l^3 I_{x,r} + l_r^3 I_x}$$

5. Визначають силу попереднього напруження $F_{п.н.}$.

$$F_{п.н.} = (F - R_{пр}) \gamma_{fm} \quad (8)$$

де γ_{fm} – коефіцієнт надійності за силою $F_{п.н.}$; $\gamma_{fm} = 1,1$. [26]

6. Визначають зазор Δ для створення сили попереднього напруження від сили $F_{п.н.}/2$, рівний сумі прогинів прогону як балки довжиною $l/2$ з жорсткою та шарнірною опорами і підсилювального елемента як консолі довжиною $l_r/2$

$$\Delta = \frac{F_{п.н.} l_r^3}{48E} \left(\frac{(8a + 3l_r) a^2}{I_x l^3} + \frac{1}{l_r} \right) \quad (9)$$

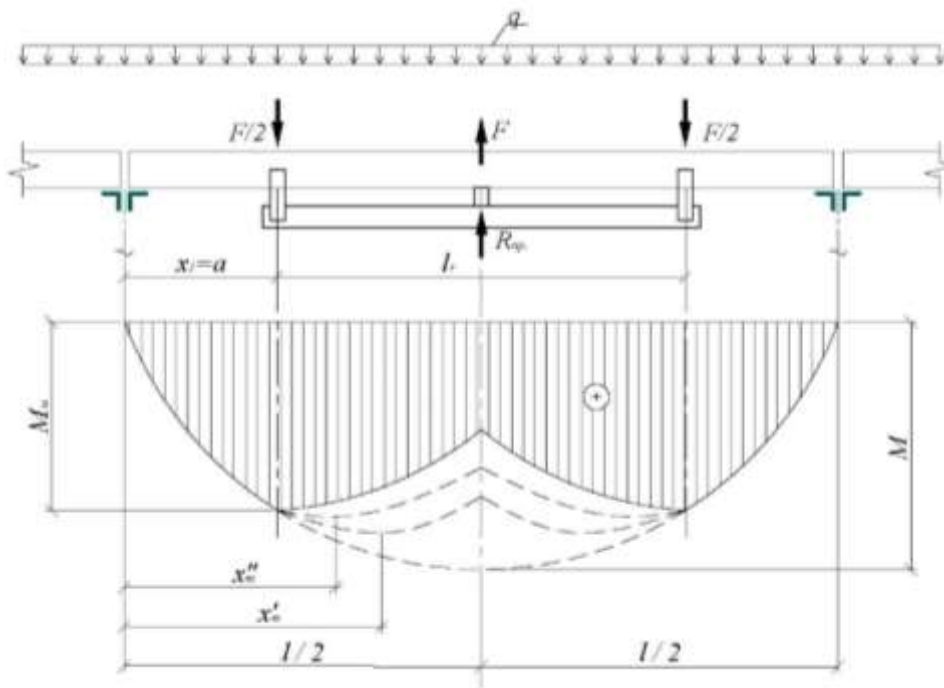


Рис. 4. Схема конструктивного рішення підсилення прогону з застосуванням пружної опори в середині прольоту і епюри моментів.

Fig. 4. Diagram of the structural reinforcement solution for the purlin using an elastic support in the middle of the span and moment diagrams.

7. Визначають діаметр болтів у вузлі регулювання зусиль за потрібною площею перерізу болта нетто при застосуванні двох болтів [25]

$$A_{bn} = \frac{(F_{п.н.} + R_{пр})\gamma_n}{4R_{bt}\gamma_c} \quad (10)$$

γ_n – коефіцієнт відповідальності [24];

8. Перевіряють напруження в прогоні на середині довжини при регулюванні зусиль

$$\sigma = \left| \frac{q_n l^2 - 2F_{п.н.} l_r}{8W_x} \right| \leq \frac{R_y \gamma_c}{\gamma_n} \quad (11)$$

9. Перевіряють прогин на середині прольоту (наприклад, при використанні q_e [26])

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_e l^4}{EI_x} - \frac{F}{48EI_x} \times (l^3 + 4a^3 - 3al^2) \leq f_u / \gamma'_n \quad (12)$$

Приклад 1.

Розрахувати підсилення прогону при малоухильній покрівлі. Прогін із швелера №24У з характеристиками:

$$W_x = 242 \text{ см}^2;$$

$$I_x = 2900 \text{ см}^2;$$

маса 1 м 24 кг.

Розрахунковий опір матеріалу прогону і підсилювальних елементів $R_y = 240$ МПа, коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = 1$.

Постійне навантаження:

- граничне $q_n = 4$ кН/м,

- експлуатаційне $q_{n,e} = 3,6$ кН/м.

- змінне навантаження, яке діє після підсилення: граничне $q_s = 13,21$ кН/м, експлуатаційне $q_{s,e} = 12,7$ кН/м.

Загальне навантаження:

- граничне $q = 17,21$ кН/м,

- експлуатаційне $q_e = 16,3$ кН/м.

Клас наслідків СС2, коефіцієнт відповідальності при першій та другій групах граничних станів: $\gamma_n = 1,05$; $\gamma'_n = 0,975$. Підсилення здійснити з застосуванням пружної опори в середині прольоту і епюри моментів (див.рис.4).

1. Визначаємо відстань від опори прогону до осі вузла з'єднання з підсилювальним елементом

$$a = \frac{6}{2} - \sqrt{\frac{6^2}{4} - \frac{2 \cdot 24 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 242 \cdot 10^{-6}}{17,21 \cdot 1,05}} = 1,4 \text{ м.}$$

2. Визначаємо потрібну силу F :

$$F = q(l - 2a) = 17,21(6 - 2 \cdot 1,4) \approx 55 \text{ кН}$$

3. Підбираємо поперечний переріз підсилювального елемента:

$$l_r = l - 2a = 6 - 2 \cdot 1,4 = 3,2 \text{ м;}$$

$$W_{потр} = \frac{F}{2} \cdot \frac{l_r \gamma_n}{2R_{yr} \gamma_c} = \frac{55}{2} \cdot \frac{3,2 \cdot 1,05 \cdot 10^6}{2 \cdot 24 \cdot 10^4} = 192,5 \text{ см}^3;$$

беремо швелер №22П з $W_{x,r} = 193 \text{ см}^3 > 192,5 \text{ см}^2$, $I_{x,r} = 2120 \text{ см}^4$, маса 1 м 21 кг.

4. Визначаємо реакцію пружної опори

$$R_{пр} = 2 \cdot 13,21 \left(\frac{5}{16} \cdot 6^4 - 1,4 \cdot 6^3 + 2 \cdot 1,4^3 \cdot 6 - 1,4^4 \right) \times \frac{2120}{6^3 \cdot 2120 + 3,2^3 \cdot 2120} = 13,34 \text{ кН.}$$

5. Визначаємо силу попереднього напруження

$$F_{п.н.} = (55 - 13,34)1,1 = 45,826 \text{ кН.}$$

6. Визначаємо зазор у вузлі регулювання зусиль для створення попереднього напруження

$$\Delta = \frac{826 \cdot 3,2^3}{48 \cdot 2,06 \cdot 10^8} \left[\frac{(8 \cdot 1,4 + 3 \cdot 3,2) \cdot 1,4^2}{2900 \cdot 10^{-8} \cdot 6^3} + \frac{1}{2120 \cdot 10^{-8}} \right] = 0,008152 \text{ м;}$$

беремо $\Delta = 0,9 \text{ см.}$

7. Визначаємо діаметр болтів у вузлі регулювання зусиль:

беремо клас міцності болтів 5.6 з $R_{bt} = 22,5 \text{ кН/см}^2$; кількість болтів $n_b = 2$; $A_{bn} = \frac{(F_{п.н} + R_{пр})\gamma_n}{n_b 2R_{bt}} = \frac{(45,826 + 13,34) \cdot 1,05}{2 \cdot 22,5} = 0,69 \text{ см}^2$;
беремо $d = 16 \text{ мм}$ з $A_{bn} = 1,57 \text{ см}^2 > 0,69 \text{ см}^2$.

8. Перевіряємо напруження в прогоні на стадії регулювання зусилля

$$\sigma = \left| \frac{4 \cdot 600^2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 45,826 \cdot 320}{8 \cdot 242} \right| \cdot 10 \\ == 77,1 \text{ МПа} < \frac{240 \cdot 1}{1,05} \\ = 229 \text{ МПа.}$$

9. Перевіряємо прогин на середині прольоту

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{16,3 \cdot 6^4}{2,06 \cdot 10^8 \cdot 2900 \cdot 10^{-8}} \\ - \frac{1}{48} \cdot \frac{2,06 \cdot 10^8 \cdot 2900 \cdot 10^{-8} (6^3 + 4 \cdot 1,4^3 - 3 \cdot 1,4 \cdot 6^2)}{600} = 0,0315 \text{ м} \\ = 3,15 \text{ см} \approx \frac{600}{200 \cdot 0,975} \\ = 3,08 \text{ см.}$$

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропонований метод підсилення прогонів і балок із застосуванням пружної опори у прольоті є ефективним інженерним рішенням, яке підвищує несучу здатність конструкцій. Суть методу полягає у встановленні спеціального елемента (підпруги) під конструкцію, яку необхідно підсилити (балка, прогін). Підпругу додатково закріплюють болтовими з'єднаннями та підкладками. Це створює додаткові пружні опори, що знижують навантаження на підсилюваний елемент, розподіляючи його між основним прогоном і підпругами.

Основні переваги цього методу:

1. **мінімальне втручання в конструкцію** – оскільки підсилення виконується без зварювання і без порушення

цілісності основного прогону, це зменшує ризик пошкодження та спрощує монтаж;

2. **створення попереднього напруження** – передбачений зазор Δ на кінцях підпруг дозволяє створити попереднє напруження при затягуванні болтів, що підвищує жорсткість конструкції та забезпечує ефективний перерозподіл навантажень;
3. **підвищення надійності** – завдяки перерозподілу навантаження конструкція стає більш стійкою до деформацій і тривалих навантажень, що забезпечує її довговічність і безпечну експлуатацію.

Оскільки в науково-технічній літературі не розроблено повного розрахунку для такого підсилення, дана стаття заповнює цю прогалину, надаючи необхідну розрахункову методичку. Такий підхід дозволить більш широко впровадити метод у будівельну практику, підвищуючи надійність та ефективність конструкцій при мінімальних витратах на додаткові матеріали та час на монтаж.

Розроблена методика розрахунку підсилення прогонів і балок для типових конструктивних рішень проста і забезпечить надійну роботу підсилених конструкцій. Подальша задача для розвитку цієї тематики – дослідження параметрів, що впливають на величину реакції пружних опор.

Запропонований метод підсилення показаний на прикладі сталевих конструкцій, але при необхідності може бути інтерпольований і на конструкції з інших матеріалів, таких як дерев'яні чи залізобетонні.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Бабічев П., Глігін О., Радецький С. (2019).** Практична методика розрахунку підсилення металевих прогонів і балок шляхом улаштування двох пружних опор в прольоті. *Містобудування та територіаль-не планування*, (71), 46–52. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2019.71.46-52>

2. Михайловський Д., Комар М. (2022). Аналіз напружено-деформованого стану рам з клеєної деревини підсилених композитними стрічками. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (11), 53–60.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.53-60>
3. Панченко О., Іваницький Я., Кунь П., Журавський, О. (2017). Визначення довговічності залізобетонних мостових балок, підсилених композитними стрічками// *Фізико-Хімічна Механіка Матеріалів*. -2017. -Т. 53, NO 5. -С. 73-77.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2017_53_5_12
4. Сморгалов Д., Затилюк Г., Винокур В. (2024). Підсилення монолітних залізобетонних конструкцій з використанням попередньо напружених арматурних канатів // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, ЛНТУ. 2024, Випуск 21.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-24).
5. Colombi P., Vocciarelli M., Calabrese A.S., D'antino T., PAPA T. (2024). Externally Bonded CFRP Reinforcement of Steel Structures: Mechanical Characterization of a Toughened Epoxy Adhesive. *Proceedings of the 6th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. SMAR 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 259. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-3362-4_50
6. Permyakov v., Glitin O. (2006) Optimum design of transverse frames containing elements of variable stiffness in frameworks of buildings *Proceedings of the 11th International Conference on Metal Structures, ICMS-2006 - Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures*.
7. Білик А., Білик С., Глітін О., Джанов Л. (2022). Оптимальна висота сталевих двотаврових балок зі змінною шириною полиць. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (12), 42–52.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.42-52>
8. Лавріненко Л., Олійник Д. (2020). Области оптимальних параметрів сталевих гофро-важких балок. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (7), 45–56.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.45-56>
9. Yurchenko V., Peleshko I. (2022). Optimization of cross-section dimensions of structural members made of cold-formed profiles using compromise search . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 № 7 (119), 84–95.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.261037>
10. Абрамов В.М. До питання оцінки технічного стану будівельних конструкцій, будівель і споруд. – В.М. Абрамов, С.В. Колесніченко. Будівництво України, №4. 2016. С. 2-5.
11. Клименко Є.В. Методика прогнозування технічного стану / *Вісн. Одес. держ. акад. будівництва та архітектури*. Вип.26. Одес. держ. акад. будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2007. С. 172–179.
12. Клименко Є.В., Дорофєєв В.С. Технічний стан залізобетонних конструкцій після нетривалого перевантаження. / *Вісн. Одес. держ. акад. будівництва та архітектури*. Вип. 23. Одес. держ. акад. будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА, 2006. С. 69–76.
13. Гетун, Г., Колякова, В. ., Соломін, А., & Безклубенко, І. (2022). Особливості проектування сталевих сейсмостійких конструкцій висотних будівель. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (11), 18–31
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.18-31>
14. Chyrva, T. ., Martynov, V., Koliakova, V., & Chyrva, V. (2022). A the influence of blasting on buildings and constructions. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (10), 143–149.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.143-149>
15. Колесніченко С.В. Оцінка ризику експлуатації металевих конструкцій. / *Збірник наукових праць Укрнідпроект-стальконструкція ім. В.М. Шимановського*. Відп.ред. О.В. Шимановський // Київ: – Вид-во «Сталь», 2010. Вип. 5. – С. 151-158.
16. Колесніченко С.В. Принципи визначення залишкового ресурсу будівельних конструкцій в умовах їх довготривалої експлуатації. *Збірник наукових праць Укрнідпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського*./ Відп.ред. О.В. Шимановський // Київ: - Вид-во «Сталь», Вип. 7.- 2011- С. 86-96.
17. Колесніченко С.В. Визначення технічного стану сталеві кроквяної ферми промислової будівлі за показником індексу надійності β. /С.В. Колесніченко, І.Ю. Черних // *Вісті Донецького гірничого інституту. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. - Покровськ, ДВНЗ «ДонНТУ» 1(44) 2019. – С. 107-115. DOI:

- <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-107-115>.
18. **Kolesnichenko S.** The Principles of Risk Assessment for Building Steel Structures with Imperfections. – *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. Volume-8. Issue-8. June 2019. – pp. 2735 – 2739.
 19. **Колесніченко С. В.** Загальні принципи оцінки ризику експлуатації сталевих конструкцій та визначення їх залишкового ресурсу. / С. В. Колесніченко, Ю. В. Селютін, І. Ю. Черних, К. Б. Мнацаканян // *Scientific Journal «ScienceRise» № 11(40) 2017*. - С. 37-42. DOI:10.15587/2313-8416.2017.116444.
 20. **Перельмутер А.В.** Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні /А.В. Перельмутер, В.М. Гордеев, Є.В. Горохов та ін. Київ: УІНСіЗР, 2002. 92 с.
 21. **Koliakova, V., Dumych, A., & Sumak, A.** (2024). Stress-strain state of shelter structures under the action of air shock wave. *Sworld-U.S Conference Proceedings, 1(usc22-01)*, 49–56. <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2024-22-00-020>
 22. **Шимановський О.В., Колесніченко С.В.** Визначення процедури та складу обстеження з метою розрахунку залишкового ресурсу / "Промислове будівництво та інженерні споруди». № 3, 2018. - С. 2-6.
 23. **ДСТУ Б В.2.6-210:2016.** Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. *Чинний від 2017-01-01. Вид. офіц.*. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 52 с.
 24. **ДСТУ 9273:2024.** Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. *Чинний від 2024-09-01. Вид. офіц.* Київ, ДП УкрНДНЦ, 2024.
 25. **ДСТУ Б В.3.1-2:2016** Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. *Чинний від 2017-04-01. Вид. офіц.* Київ, ДП УкрНДНЦ, 2016.
 26. **ДБН В.1.2-14:2018.** Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною №1. *Чинні з 2022-09-01. Київ, Мінрегіон України, 2022*. – 35 с.
 27. **ДБН В.2.6-198:2014** Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1 *Чинні з 2022-09-01. Київ, Мінрегіон України, 2014*. – 298 с
 28. **ДБН В.1.2-2:2006.** Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі зміною №1 та №2. *Чинні з 2020-06-01. Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006*. – 68 с.

REFERENCES

1. **Babichev P., Glitin O., Radetskyi S. (2019).** Praktychna metodyka rozrakhunku pidsylennia metalevykh prohonyv i balok shliakhom ulashtuvannya dvokh pruzhnykh opor v proloti. *Mistobu duvannia ta terytorialne planuvannia*, (71), 46–52. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2019.71.46-52>
2. **Mykhailovskyi D., Komar M. (2022).** Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu ram z kleienoї derevyny pidsylenykh kompozytnymy strichkamy. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (11), 53–60. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.53-60>
3. **Panchenko O., Ivanytskyi Ya., Kun P., Zhuravskyi, O. (2017).** Vyznachennia dovhovichnosti zalizobetonnykh mostovykh balok, pidsylenykh kompozytnymy strichkamy// *Fyzyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*. - 2017. -T. 53, NO 5. -S. 73-77. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2017_53_5_12
4. **Smorkalov D., Zatyliuk H., Vynokur V. (2024).** Pidsylennia monolitnykh zalizobetonnykh konstruksii z vykorystanniam poperedno napruzhenykh armaturnykh kanativ // *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Lutsk, LNTU. 2024, Vypusk 21*. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-24).
5. **Colombi P., Bocciarelli M., Calabrese A.S., Dantino T., Papa T. (2024).** Externally Bonded CFRP Reinforcement of Steel Structures: Mechanical Characterization of a Toughened Epoxy Adhesive. *Proceedings of the 6th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. SMAR 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 259. Springer, Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3362-4_50
6. **Permyakov v., Glitin O. (2006)** Optimum design of transverse frames containing elements of variable stiffness in frameworks of buildings *Proceedings of the 11th International Conference on Metal Structures, ICMS-2006 - Progress*

- in Steel, Composite and Aluminium Structures. ISBN: 0415401208 9780415401203*
7. **Bilyk A., Bilyk S., Glitin O., Dzhanov L. (2022).** Optymalna vysota stalevykh dvotavrovyykh balok zi zminnoiu shyrynoiu polyts. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (12), 42–52. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.42-52>
 8. **Lavrinenko L., Oliinyk D. (2020).** Oblasti optymalnykh parametriv stalevykh hofrovanykh balok. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (7), 45–56. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.45-56>
 9. **Yurchenko V., Peleshko I. (2022).** Optimization of cross-section dimensions of structural members made of cold-formed profiles using compromise search. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 № 7 (119), 84–95. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.261037>
 10. **Abramov V.M.** Do pytannia otsinky tekhnichnoho stanu budivelnykh konstruksii, budivel i sporud. – **V.M. Abramov, S.V. Kolesnichenko.** *Budivnytstvo Ukrainy*, №4. 2016. S. 2-5.
 11. **Klymenko Ye.V.** Metodyka prohnozuvannia tekhnichnoho stanu / *Visn. Odes. derzh. akad. budivnytstva ta arkhitektury. Vyp.26. Odes. derzh. akad. budivnytstva ta arkhitektury. Odesa: ODABA, 2007. S. 172–179.*
 12. **Klymenko Ye.V., Dorofiev V.S.** Tekhnichni stan zalizobetonnykh konstruksii pislia netryvaloho perevantazhennia. / *Visn. Odes. derzh. akad. budivnytstva ta arkhitektury. Vyp. 23. Odes. derzh. akad. budivnytstva ta arkhitektury. Odesa: ODABA, 2006. S. 69–76.*
 13. **Getun, H., Koliakova, V., Solomin, A., & Bezklubenko, I. (2022).** Osoblyvosti proiektuvannia stalevykh seismostiikykh konstruksii vysotnykh budivel. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (11), 18–31. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.18-31>
 14. **Chyrva, T., Martynov, V., Koliakova, V., & Chyrva, V. (2022).** A the influence of blasting on buildings and constructions. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (10), 143–149. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.143-149>
 15. **Kolesnychenko S.V.** Otsinka ryzyku ekspluatatsii metalevykh konstruksii. / *Zbirnyk naukovykh prats Ukrndipro-ektstalkonstruksiiia im. V.M. Shymanovskoho. Vidp.red. O.V. Shymanovskyi // Kyiv: – Vyd-vo «Stal», 2010. Vyp. 5. – S. 151-158.*
 16. **Kolesnychenko S.V.** Pryntsypy vyznachennia zalyshkovoho resursu budivelnykh konstruksii v umovakh yikh dovhotryvaloï ekspluatatsii. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrndipro-ektstalkonstruksiiia im. V.M. Shymanovskoho./ Vidp.red. O.V. Shymanovskyi // Kyiv: - Vyd-vo «Stal», Vyp. 7.- 2011- S. 86-96.*
 17. **Kolesnichenko S.V.** Vyznachennia tekhnichnoho stanu stalevoi krokvianoï fermy promyslovoi budivli za pokaznykom indeksu nadiinosti β. /S.V. Kolesnichenko, I.Iu. Chernykh // *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu. Vseukrainskyi na-ukovo-tekhnichniy zhurnal. - Pokrovsk, DVNZ «DonNTU» 1(44) 2019. – S. 107-115.* [https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-107-115.](https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-107-115)
 18. **Kolesnichenko S.** The Principles of Risk Assessment for Building Steel Structures with Imperfections. – *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). Volume-8. Issue-8. June 2019. – pp. 2735 – 2739.*
 19. **Kolesnichenko S. V.** Zahalni pryntsypy otsinky ryzyku ekspluatatsii stalevykh konstruksii ta vyznachennia yikh zalyshkovoho resursu. / S. V. Kolesnichenko, Yu. V. Seliutin, I. Yu. Chernykh, K. B. Mnatsakanian // *Scientific Journal «ScienceRise» № 11(40) 2017. - S. 37-42.* [DOI:10.15587/2313-8416.2017.116444.](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.116444)
 20. **Perelmutter A.V.** Stan ta zalyshkovyi resurs fondu budivelnykh metalevykh konstruksii v Ukraini /A.V. Perelmutter, V.M. Hordeiev, Ye.V. Horokhov ta in. Kyiv: UINSiZR, 2002. 92 s.
 21. **Koliakova, V., Dumych, A., & Sumak, A. (2024).** Stress-strain state of shelter structures under the action of air shock wave. *Sworl-Us Conference Proceedings, 1(usc22-01), 49–56.* <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2024-22-00-020>
 22. **Shymanovskyi O.V., Kolesnichenko S.V.** Vyznachennia protsedury ta skladu obstezhennia z metoiu rozrakhunku zalyshkovoho resursu / *"Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy». № 3, 2018. - S. 2-6.*
 23. **DSTU B V.2.6-210:2016.** Otsinka tekhnichnoho stanu stalevykh budivelnykh konstruksii, shcho ekspluatuiutsia. *Chynnyi vid 2017-01-01. Vyd. ofits.. Kyiv: UkrNDNTs, 2016. 52 s.*
 24. **DSTU 9273:2024.** Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia

- ta otsiniuvannya yikhnoho tekhnichnoho stanu. Mekhanichniy opir ta stiikist. *Chynnyi vid 2024-09-01. Vyd. ofits. Kyiv, DP UkrNDNTs, 2024.*
25. **DSTU B V.3.1-2:2016** Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhualnykh budivelnykh konstrukttsii ta osnov budivel i sporud. *Chynnyi vid 2017-04-01. Vyd. ofits. Kyiv, DP UkrNDNTs, 2016.*
26. **DBN V.1.2-14:2018.** Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud. Zi Zminoiu №1. *Chynni z 2022-09-01. Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2022. – 35 s.*
27. **DBN V.2.6-198:2014** Stalevi konstrukttsii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu № 1 *Chynni z 2022-09-01. Kyiv, Minrehion Ukrainy, 2014. – 298 s*
28. **DBN V.1.2-2:2006.** Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Zi zminoiu №1 ta №2. *Chynni z 2020-06-01. Kyiv, Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy, 2006. – 68 s.*

AN EFFECTIVE METHOD FOR STRENGTHENING STEEL BEAMS AND PURLINS USING AN ELASTIC SUPPORT IN THE SPAN

*Oleksandr GLITIN,
Serhii BILYK,
Serhii RADETSKYI,
Oleh SONKO,
Oleksii KRAVCHENKO*

Summary. The article is devoted to the development of theoretical approaches to strengthening bending elements, such as beams and girders, through the installation of an elastic support at the midpoint of the span where the maximum bending moment occurs, as well as the development of a practical calculation method for such reinforcement. The need for strengthening may arise under

various conditions, including prolonged operation beyond the design lifespan, increased service loads on existing structures, wear and tear of structures, or damage caused by episodic additional loads (e.g., earthquakes, explosions).

The purpose of the study is to provide a practical method for reinforcing girders and beams using an elastic support at the span to increase the load-bearing capacity of structures under increased loads (e.g., installation of solar power stations or other additional equipment on roofs) or in cases of damage caused by explosions or other episodic loads that reduce the cross-sectional geometric characteristics and require rapid strengthening. The article proposes a calculation methodology for this type of reinforcement that addresses shortcomings in existing scientific and technical literature and facilitates the broader implementation of the method to enhance the reliability of structures.

The article presents an effective method for reinforcing girders and beams in response to increased loading. Using an elastic support (brace) at the span enhances the load-bearing capacity of structures. The method involves installing a brace under the element to be strengthened, secured with additional bolts to create an elastic support that reduces the applied load. This solution eliminates the need for welding or disrupting the structural integrity. A technological gap is provided to create pre-stressing, which is closed during bolt tightening. The main advantages include minimal intervention, the creation of pre-stressing, and increased structural reliability. The article contains a calculation methodology for this reinforcement method, promoting its practical application to improve the efficiency and reliability of structures.

The proposed reinforcement method is demonstrated on steel structures but can be extended, if necessary, to structures made of other materials, such as wood or reinforced concrete.

Keywords: episodic loads, explosive impacts, emergency loads, emergency structures, reinforcement, steel structures.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2024