

## Методика визначення зон концентрації максимальних напружень в балках з клеєної деревини підсилених композитними стрічками

Микола Комар, здобувач ступеня вищої освіти PhD<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-3631-8999),  
Денис Михайловський, д.т.н., професор<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-3151-8630)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Україна

### АНОТАЦІЯ

Представлено методику урахування складного напруженого стану в балках з клеєної деревини підсилених композитними стрічками, яка базується на визначенні зон концентрації комбінації напружень, за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР.

*Ключові слова:* балка, дерев'яні конструкції, складний напружений стан, клеєна деревина композитні стрічки, напруження, Sika CarboDur.

### 1. ВСТУП

Масове застосування клеєної деревини в інженерії та архітектурі почалося в ХХ столітті завдяки здатності цього матеріалу витримувати великі навантаження при порівняно невеликій вазі, наразі будівельна галузь спостерігає за стрімким розвитком будівництва споруд з застосуванням деревини та матеріалів на її основі.

Однією з головних переваг клеєної деревини є її міцність і стабільність. Балки з клеєної деревини здатні витримувати великі навантаження, що робить їх ідеальними для будівництва мостів, багатоповерхових будівель та великих прольотів без додаткових опор. Крім того, клеєна деревина має чудові естетичні властивості, поєднуючи природну красу деревини з високими механічними характеристиками. Вона також є екологічно чистим матеріалом, оскільки виробляється з відновлюваних ресурсів і має низький вуглецевий слід у порівнянні з іншими будівельними матеріалами.

Проте, деякі будівельні вимоги, наприклад умови обмеження будівельної висоти, коли застосування порівняно великих перерізів конструкцій з клеєної деревини, розрахованих з додержанням вимог граничних станів, є неможливим. Тому все більшої актуальності набуває пошук і дослідження модифікованих конструкцій з клеєної деревини, в тому числі підсилених за допомогою композитних матеріалів, для збільшення несучої здатності при зменшенні їхнього поперечного перерізу.

### 2. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є презентація методики урахування складного напруженого стану в балках з клеєної деревини підсилених композитними стрічками, яка базується на визначенні зон концентрації комбінації напружень, за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР.

### 3. ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИТНИХ СТРІЧОК ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ БАЛОК З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ

Використання композитних стрічок обумовлено пластичністю матеріалу при достатньо великому модулі

пружності, що сприяє кращій сумісній роботі з клеєною деревиною за рахунок повторення геометричного контуру та більшої міцності. Крім того, незначна вага і порівняно велике значення міцності таких стрічок, можуть забезпечити меншу вагу конструкцій та відповідно більшу їх ефективність.

Зчеплення композитної стрічки Sika CarboDur [1] з деревиною здійснюється за допомогою епоксидного клею Sikadur-30 [2] для нормального або Sikadur-30 LP для навколишнього середовища підвищеної температури при монтажі або експлуатації.

Суть підсилення балок з клеєної деревини композитними стрічками полягає в тому, що на розтягнуту зону поперечного перерізу наклеюється композитні стрічки. Таке армування балок дозволяє збільшити їх несучу здатність, при зменшенні геометричних розмірів поперечних перерізів.

Аналіз напружено-деформованого стану конструкцій з клеєної деревини наведений в роботі [3], а підсилених різними матеріалами розглянуто в роботах [4-5].

### 4. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН КОНЦЕНТРАЦІЇ МАКСИМАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ В БАЛКАХ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ СТРІЧКАМИ

Після забезпечення міцності при розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності, визначення зон концентрації максимальних напружень для визначення умови міцності при складному напруженому стані [3] в точці максимальної концентрації напружень, можна проводити, будь яким зручним з відомих способів. Проте найбільш ефективний є спосіб моделювання елементів в програмних комплексах об'ємними скінченними елементами для детального аналізу напружень по всьому тілу елемента.

Проведемо визначення зон концентрації максимальних напружень (рис.2) за допомогою ПК ЛІРА-САПР методом скінченних елементів.

Для прикладу визначення зон концентрації максимальних напружень розглянуто балку з клеєної деревини прольотами 4 м. (рис.1), підсилена композитними стрічками Sika CarboDur S1012. Поперечний переріз балок  $b \times h = 10 \times 24$  см. Тіло балок складається з об'ємних скінченних елементів CE №36 розмірами  $0,01 \times 0,01 \times 0,01$  м., з відповідною жорсткістю для деревини класу міцності С30.

Навантаження прикладено у вигляді лінійних сил на всю ширину поперечного перерізу моделі балки за напрямом осі Z, на відстані ¼ та ¾ прольоту, через фіктивну балку без жорсткості. Розрахунок проводився в лінійній постановці, але з врахуванням ортотропних властивостей матеріалу.

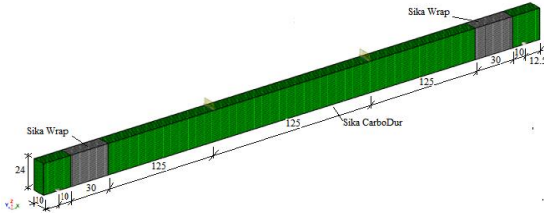


Рисунок.1 Балка з клеєної деревини підсилена композитними стрічками прольотом 4 м, змодельована в ПК ЛПРА-САПР.

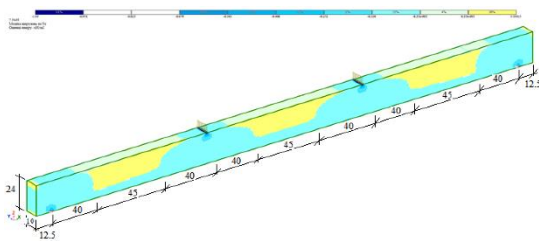


Рисунок. 2 Зони концентрації максимальних поперечних напружень в досліджуваній балці.

З проведеного дослідження видно, що концентрації максимальних напружень в крайніх прольотах має загальну величину 75 см, та діляться на дві частини які в свою чергу знаходяться на відстані по 40 см, від осей опори та дії навантаження. В середньому прольоті загальна величина концентрації максимальних напружень дорівнює 100 см, та ділиться на дві рівні частини які знаходяться на відстані по 40 см, від осей дії навантаження.

Після проведеного аналізу визначено, що зони концентрації максимальних напружень знаходиться в місцях, де найбільші максимальні поперечні напруження ( $\sigma_{90}$ ) в деревині та відповідні їм максимальні повздовжні ( $\sigma_0$ ) та дотичні напруження ( $\tau$ ).

Визначення умови міцності при складному напруженому стані в точці максимальної концентрації комбінації напружень досліджуваних балок виконуємо для максимальних поперечних напружень та відповідних для них максимальних повздовжніх та дотичних напружень за формулою:

$$\frac{\sigma_c^2}{(f_{c,0,d})^2} + \frac{\sigma_{t,90}^2}{(f_{t,90,d})^2} A_{c,t} - \frac{\sigma_c \sigma_{t,90}}{f_{c,0,d} f_{t,90,d}} C_{c,t} + \frac{\tau^2}{(f_{v,d})^2} B_{c,t} \leq 1$$

де:  $\sigma_c$  - нормальні напруження стиску вздовж волокон деревини;  $\sigma_{t,90}$  - нормальні напруження розтягу поперек волокон деревини;  $\tau$  - дотичні (сколюючі) напруження;  $f_{c,0,d}$  – розрахункове значення міцності деревини при стиску вздовж волокон;  $f_{t,90,d}$  – розрахункове значення міцності деревини при розтягу поперек волокон;  $f_{v,d}$  – розрахункове значення міцності деревини при сколюванні;  $A_{c,t}$ ,  $C_{c,t}$ ,  $B_{c,t}$  – параметри, що враховують анізотропію фізико-механічних

властивостей та початковий рівень нормальних напружень вздовж волокон [3].

Зони концентрації максимальних напружень рекомендується підсилювати за допомогою композитних матеріалів.

## 5. ВИСНОВКИ

1. Армування композитними стрічками Sika CarboDur балок з клеєної деревини дозволяє збільшити їх несучу здатність, підвищити деформативність та надійність конструкцій з їх використанням.
2. Підсилення балок з клеєної деревини композитними стрічками, перерозподіляє внутрішні напруження в тілі балок. Тому після забезпечення міцності при розрахунку елементів дерев'яних конструкцій за граничними станами несучої здатності потрібно виконувати розрахунок з урахуванням складного напруженого стану в зоні небезпечної концентрації різних напружень. В публікації запропонована методика, яка дозволяє визначити небезпечні зони концентрації напружень в підсиленних балках.
3. Після проведеного аналізу визначено, що зони концентрації максимальних напружень знаходяться в місцях де поперечні напруження ( $\sigma_{90}$ ) досягають своїх максимальних значень в деревині та супроводжуються відповідними їм максимальними повздовжніми ( $\sigma_0$ ) та дотичними напруженнями ( $\tau$ ).

## Список літератури

- [1] Технічна карта матеріалу. Ідентифікаційний номер №: 020206010010000040 Sika® CarboDur® S Стрічки з вуглецевих волокон для підсилення конструкцій - складова частина системи Sika® CarboDur® System. Березень 2018, Версія 05.01, 4с.
- [2] Технічна карта матеріалу. Ідентифікаційний номер №: 020206040010000001 Sikadur® -30. Клей, 2-х компонентний епоксидний клей для наклеювання армування. Лютий 2022, Версія 04.01, 4 с
- [3] Михайловський Д. В. Врахування дійсного напружено-деформованого стану у вузлах та елементах конструкцій з клеєної деревини. / Михайловський Д. В./ Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук // Київський національний університет будівництва і архітектури// на правах рукопису. Київ. 2020. – 420 с.
- [4] Поліщук М. В. Напружено-деформований стан згинальних елементів з клеєної деревини з комбінованим армуванням : дис. доктора філософії : 192; НУВГП. - Рівне, 2023. - 168 с.
- [5] Dániel, H., Habashneh, M. & Rad, M.M. (2022). Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. Sci Rep 12.