

РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА СТИСК ЗІ ЗГИНОМ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМОВАНОЇ СХЕМИ

Кліменко В.З., канд. техн. наук, проф., **Михайловський Д.В.**, канд. техн. наук, **Коваленко М.С.**, **Коваль А.В.**

*Київський національний університет будівництва і архітектури
03037, Україна, м.Київ, пр-т Повітрофлотський, 31*

В останні роки в усьому світі все ширшого застосування набувають конструкції з клеєної деревини. Особливо: великопрольотні ферми, арки, трикутні розпірні системи тощо. Основні несучі елементи цих конструкцій працюють на стиск зі згином. В вітчизняній практиці проектування для розрахунку таких елементів застосовується формула складного опору, в якій при визначенні розрахункового згинального моменту в деформованому стані застосовується методика, що була розроблена майже сто років тому проф. Заврієвим К.С. [1]. Суть цієї методики полягає в визначенні повного згинального моменту з умови:

$$M_{д} = M_{q} + N \cdot f_{д} , \quad (1)$$

в якій $f_{д}$ знаходиться за наближеною формулою $f_{д} = \frac{M_{q}}{N_{кр} - N}$, де $N_{кр}$ – сила

Ейлера в елементі, що працює тільки на стиск, N – розрахункове повздовжнє зусилля в елементі.

В нормах проектування та в навчально-методичній літературі формула (1) записана у вигляді

$$M_{д} = M / \xi , \quad (2)$$

де коефіцієнт ξ непрямо враховує деформовану схему.

Методика проф. Заврієва К.С. адекватно відображає фізичне явище в стиснуто-згинних елементах з гнучкістю в площині згину $\lambda \geq 55$, коли коефіцієнт повздовжнього згину знаходиться на параболі Ейлера на графіку $\lambda - \varphi$.

Як показує практика, в сучасних великопрольотних конструкціях з клеєної деревини гнучкість елементів знаходиться в діапазоні $20 \leq \lambda \leq 55$. При таких гнучкостях існуюча методика перестає адекватно відображати фізичне явище, що спостерігається. Однак, завдяки математичній структурі формули для визначення коефіцієнта $\xi = 1 - N / (\varphi \cdot A \cdot R_c)$ суттєво нівелюється значення коефіцієнту φ в широкому діапазоні його величин. В [2, 3] зроблено висновок, що випадкове співпадіння розрахунків для елементів з $\lambda \leq 55$ (в яких коефіцієнт повздовжнього згину становиться більше одиниці, що протиречить природі стійкості стиснутого елемента) не може бути обґрунтуванням існуючої методики розрахунку.

Авторами статті запропоновано власну методику розрахунку стиснуто-згинальних елементів [4]. За цією методикою розрахунковий момент з врахуванням деформованої схеми елементів визначається за формулою

$$M_{розр} = M_q + N \cdot f_q + N \cdot U \cdot \left(\frac{f_q}{EI - U} \right), \quad (3)$$

в якій: $M_q = \frac{q \cdot L^2}{8}$ – момент в елементі від поперечного навантаження без врахування деформованої схеми; $f_q = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI}$ – прогин елемента від поперечного навантаження без врахування деформованої схеми; $U = N \cdot \frac{L^2}{\pi^2}$ – параметр.

Формула (3) дещо складніша за формулу (1) наведену в нормах проектування та в навчально-методичній літературі, але вона більш точно передає фізичне явище, яке відбувається в елементах, що працюють на стиск зі згином. З позиції викладачів вищої школи запропонована методика краща з методологічної точки зору.

Для перевірки запропонованої методики було проведено ряд чисельних досліджень, що стосувались визначенню розрахункового згинального моменту та крайового напруження в панелях верхніх поясів ферм. Для можливості співставлення результатів загальна геометрія ферм і навантаження прийняті однаковими. Змінювався лише тип решітки ферм, а відповідно довжини елементів верхнього поясу. Елементом задавались фізико-механічні характеристики згідно СНиП II-25-80 [5]: розрахунковий опір на згин – $R_{sz} = R_c = 15$ МПа (для деревини 2-го сорту); модуль пружності вздовж волокон $E = 10000$ МПа.

Задачу реалізовано за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) в сучасному програмному комплексі Лира 9.6 в геометрично-нелінійній постановці з застосуванням скінченого елемента типу 310, якому надавались задані геометричні та фізико-механічні характеристики. При моделюванні нелінійного завантаження обирався автоматичний вибір кроку з пошуком нових форм рівноваги. Результати розрахунків представлено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Довжина елемента, см	Параметр	Методика СНиП II-25-80	Запропонована методика	МСЕ (Лира 9.6)
1	2	3	4	5
150	$M_{розр}$, кНм	3,92	3,69	3,69
	$f_{розр}$, мм	0,46	0,44	0,436

1	2	3	4	5
300	$M_{розр}$, кНм	16,88	15,26	15,24
	$f_{розр}$, мм	3,27	2,95	2,94
450	$M_{розр}$, кНм	38,38	34,48	34,45
	$f_{розр}$, мм	7,82	7,01	7,00
600	$M_{розр}$, кНм	67,60	61,05	60,99
	$f_{розр}$, мм	13,16	11,86	11,90
900	$M_{розр}$, кНм	148,03	135,80	135,70
	$f_{розр}$, мм	24,90	22,80	22,80

Як видно з одержаних результатів (таблиця 1) розв'язки задачі за запропонованою методикою (стовпчик 4 таблиці 1) та вирішені за допомогою МСЕ в нелінійній постановці (стовпчик 5 таблиці 1) майже повністю збігаються. Результати ж одержані за методикою СНиП (стовпчик 3 таблиці 1) суттєво відрізняються від двох інших (стовпчики 4 та 5 таблиці 1).

Зі збільшенням прольоту стиснуто-згинального елемента різниця між наближеною методикою СНиП ІІ-25-80 та двома іншими, більш точними методиками, стає все більшою.

Це ще раз підтверджує думку про те, що не завжди формальний перенос вдалої методики розрахунку елементів конструкцій з суцільної деревини (незначна довжина елементів) на елементи конструкцій з клеєної деревини, без ретельного обґрунтування, стає еволюційним кроком [6]. А саме це відбулось з методикою розрахунку крупнопанельних конструкцій з клеєної деревини елементи яких працюють на стиск зі згином.

Хороша збіжність результатів розрахунку МСЕ в нелінійній постановці з точним методом розрахунку дозволяє припустити можливість точного визначення розрахункового згинального моменту і в криволінійних стиснуто-згинальних елементах. Саме як такі елементи працюють верхні пояси сегментних ферм з клеєної деревини, які набувають все ширшого розповсюдження. В Європі малоелементні сегментні ферми прольотом більше 40 м навіть набули статусу типових.

Існуючі методики розрахунку верхніх поясів сегментних ферм, детально розглянуті в [7, 8], не зовсім адекватно відображають фізичне явище, що в них відбувається.

В даній публікації представлені результати чисельних досліджень верхніх поясів сегментних ферм прольотом 26 м з різним типом решітки, а відповідно довжиною елементів верхнього поясу. Для можливості співставлення результатів загальна геометрія ферм, навантаження та фізико-механічні властивості матеріалу прийняті однаковими.

В рамках дослідження виконано розрахунки за трьома методиками:

1. Методика представлена в п. 6.35 Посібника до СНиП ІІ-25-80 [9]:

$M_{розр} = M_q - M_{розв} = M_q - N \cdot f_n$, в якій f_n – проектна стріла вигину панелі.

2. Запропонована авторами методика з урахуванням деформованої схеми:

$$M_{д} = M_q - N \cdot (f_n + f_N - f_q),$$

де $f_q = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_q \cdot l_{ef}^2}{E \cdot I}$ – прогин від поперечного навантаження;

$f_N = \frac{5}{48} \cdot \frac{N \cdot f_n \cdot l_{ef}^2}{E \cdot I}$ – вигин від поздовжньої сили.

3. Метод скінчених елементів в геометрично нелінійній постановці за допомогою програмного комплексу Лира 9.6 з застосуванням скінченого елемента типу 310, якому надавались задані геометричні та фізико-механічні характеристики деревини. При моделюванні нелінійного завантаження обирався автоматичний вибір кроку з пошуком нових форм рівноваги.

Результати чисельних досліджень наведено в таблиці 2.

Існуючі методики розрахунку не наводять формули для визначення дійсного прогину криволінійного стиснуто-згинального елемента з урахуванням деформованої схеми.

З таблиці 2 видно, що жодна з аналітичних методик не відповідає рішенняю задачі методом скінчених елементів в геометрично нелінійній постановці. Хоча запропонована авторами методика дає більш достовірні результати ніж методика що міститься в СНиП II-25-80.

Таким чином можна зробити висновок, що питання визначення розрахункового згинального моменту та прогину при розрахунку верхніх поясів сегментних ферм залишається актуальним і потребує ґрунтовного дослідження. Особливо важливе вирішення цієї задачі для розрахунку сучасних великопрольотних конструкцій з клеєної деревини.

Таблиця 2

Прольот елемента, см	Параметр	Методика Посібника	Запропонована методика	МСЕ (Лира 9.6)
1	2	3	4	5
493,6	$M_{розр}$, кНм	2,48	3,40	4,14
	$f_{розр}$, мм	-	-	0,436
603,3	$M_{розр}$, кНм	3,60	4,90	6,20
	$f_{розр}$, мм	-	-	2,94
712,9	$M_{розр}$, кНм	5,00	7,00	8,66
	$f_{розр}$, мм	-	-	7,00

1. Завриев К.С. Расчет стержней на одновременное действие изгиба и осевого сжатия. – Тифлис, 1932.

2. Клименко В.З. Развитие метода расчета сжато-изогнутых элементов в историческом аспекте / 3б. наук. праць УкрНДІ проектстальконструкція ім. В.М. Шимановського.

Вип. 5. – К.: “Сталь”, 2010. – С. 130–139.

3. Клименко В.З. Устранение методологического диссонанса в расчете деревянных элементов, работающих на изгиб со сжатием / Промислове будівництво та інженерні споруди. №2, 2010. – С. 41–44.

4. Щодо розрахунку елементів з клеєної деревини, що працюють на стиск зі згином. Клименко В.З., Михайловский Д.В., Коваленко М.С. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр. Вып. 60, Днепропетровск, ПГАСА, 2011. – С. 79-84.

5. СНиП II-25-80 Деревянные конструкции / Госстрой СССР – М.: Стройиздат, 1982. – 66 с.

6. «Проектирование современных конструкций из клееной древесины на принципах новой концепции» / Клименко В.З., Найчук А.Я., Фурсов В.В., Михайловский Д.В. – К. Видавництво «Сталь», 2010. – 24 с.

7. Клименко В.З., Коваль А.В. Работа элементов на стиск зі згином у сегментних фермах / В Наук.-техн зб.: Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2010. – Вип. 38. – С. 192-202.

8. Клименко В.З., Коваль А.В. Розрахунок сегментних ферм з клеєної деревини / В збірнику наукових праць: Современные строительные конструкции из металла и древесины. Вип. 15. Часть 2. – 2011. Одеса: ОДАБА. – С. 116-121.

9. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1986. – 216 с.