

УДК 624.011.2

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНО-БЕТОННИХ КОМПОЗИТНИХ ПЛИТ

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПРИМЕНЕНИЯ ДЕРЕВЯННО-БЕТОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛИТ

DISTINCTIONS IN CALCULATION AND APPLICATION OF WOOD-CONCRETE COMPOSITE SLABS

Михайловський Д.В., к.т.н., доц., Мавдюк А.М., студент (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)

Михайловский Д.В., к.т.н., доц., Мавдюк А.М., студент (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев)

Mikhaylovskiy D.V. candidate of technical sciences, docent, Mavdiuk A.M., student (Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv)

Розглянуто ефективність застосування дерев'яно-бетонних композитних плит в якості перекриття, показано основні положення розрахунку та сферу застосування даної конструкції на об'єктах будівництва.

Рассмотрена эффективность применения деревянно-бетонных композитных плит в качестве перекрытия, показаны основные положения расчета и область применения данной конструкции на объектах строительства.

The effectiveness of wood-concrete composite slabs use as the floor is reviewed, the basic provisions of the calculation and the scope of application of this element on the objects of construction are presented.

Ключові слова:

Дерев'яно-бетонна композитна плита, з'єднувальні елементи, основи розрахунку.

Дервянно-бетонная композитная плита, соединительные элементы, основы расчета.

Wood-concrete composite slab, connecting elements, basis of calculation.

Вступ. Останнім часом дерев'яні конструкції набувають все більшої популярності в будівельній галузі, це зумовлено високими фізичними та механічними властивостями матеріалу. Постійні дослідження

продовжують вдосконалювати властивості матеріалів із наявністю деревини. Останні спроби були представлені розробкою сумісної системи із комбінації бетону, деревини та з'єднуючих елементів в якості монолітної плитної системи.

Постановка мети і задачі досліджень. Розглянути теоретичні положення розрахунку дерев'яно-бетонних композитних плит та виконати аналіз сфери застосування даної конструкції.

Основні положення розрахунку. Розрахунок дерев'яно-бетонних композитних плит базується на будівельних нормах які наведені в DIN 1052 [2] та DIN 1045-1 [3].

Модулі пружності деревини та бетону, необхідні для розрахунку, є прийнятими за DIN 1052 [2], DIN 1045-1 [3] або ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції. Основні положення» [12]. Вирішальний вплив на розподіл внутрішніх зусиль в композитному поперечному перерізі, має модуль зсуву з'єднувального елемента в стику. Для визначення розмірів поперечного перерізу за граничним станом несучої здатності (перший граничний стан (ІГС)) ми повинні зменшити значення середнього модуля зсуву K_{ser} на третину, оскільки в нормативному документі значення вказано максимальне. Виходячи з чого отримуємо:

$$K_{u,mean} = \frac{2}{3} K_{ser} \quad (1)$$

Вплив повзучості обумовлений зменшенням модуля пружності окремих частин перерізу. Згідно розділу 8.6.1 стандарту DIN 1052 [2] модуль пружності деревини повинен бути поділений на $(1+k_{def})$. Поведінка повзучості бетонної плити може бути спрощена діленням на 3,5.

В залежності від схеми конструкції (див. рис.1) при розрахунку за експлуатаційною придатністю вводять значення понижуючих коефіцієнтів модуля зсуву $k_{VBM}=2/3$ для суцільної схеми і $k_{VBM}=1/2$ для балочної. В свою чергу для балочної системи сформувались типові рішення поперечних перерізів (рис. 2) та конструкції з'єднання (рис.3) між ними, які здобули з часом найбільшого використання в будівництві.

В табл. 1 наведені основні характеристики потрібні для розрахунку дерев'яно-бетонних плит.

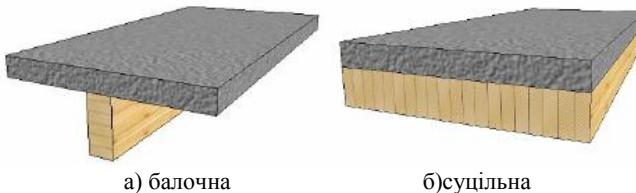


Рис. 1. Різновиди композитних дерев'яно-бетонних плит

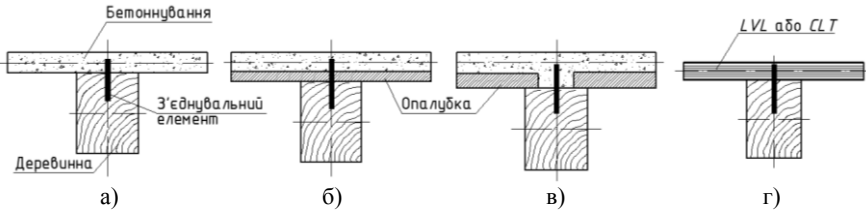


Рис. 2 Типові поперечні перерізи дерев'яно-бетонних композитних плит
 а) монолітне бетонування із знімною опалубкою; б) конструкція із незнімною неперервною опалубкою; в) конструкція із незнімною перерваною опалубкою для встановлення з'єднувальних елементів; г) замонолічування з додатковою дошкою із LVL-бруса або CLT-панелі

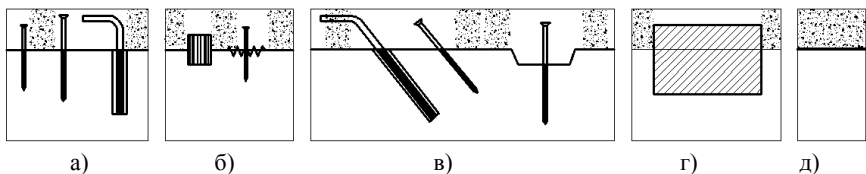


Рис. 3 Типові з'єднувальні системи в поздовжньому напрямку
 а) дюбелі (зазвичай гвинти) або арматура розміщена перпендикулярно до поздовжньої осі стику; б) з'єднання на кільцевих та зсувних пластинах; в) дюбелі або арматура розміщена під 45° до осі стику; г) сталеві сітка або плита склеєна епоксидною смолою; д) безпосереднє склеювання двох елементів на основі епоксидної смоли

При переході до визначення ефективних геометричних характеристик перерізу, важливою складовою розрахунку є врахування коефіцієнта послаблення γ внаслідок можливої піддатливості окремих складових. Особливості розрахунку за допомогою

γ -методу полягають у врахуванні піддатливості всіх складових конструкції.

Важливим показником який може суттєво впливати на експлуатаційні характеристики системи виступає ефективна відстань між елементами з'єднання s_{ef} .

Згідно стандарту [4] ефективна відстань між з'єднанням повинна бути в межах 3-4% довжини балки, або визначена за формулою:

$$S_{ef} = 1,14 \cdot s_{\min} + 3,14 \frac{s_{\max}}{l} (s_{\max} - s_{\min}); \quad (2)$$

в якій: значення максимальної (s_{\max}) і мінімальної (s_{\min}) відстані між елементами, які визначаються в залежності від типу з'єднання, товщини та ширини елемента [5].

Розрахункові характеристики компонентів системи

Матеріал	Граничні стани	Початок експлуатації ($t=0$)	Закінчення строку придатності до нормальної експлуатації ($t=\infty$)
Деревина (E_{wood})	I, II	$E_{0,mean}$	$\frac{E_{0,mean}}{(1 + k_{def})}$
Бетон (E_{beton})	I, II	$E_{0,m}$	$\frac{E_{cm}}{3,5}$
З'єднуючий елемент (K_{ser})	I	K_{ser}	$k_{VBM} \cdot K_{ser}$
	II	$2/3 \cdot K_{ser}$	$2/3 \cdot k_{VBM} \cdot K_{ser}$

Для виконання розрахунку призначимо індекси «1» та «2» які будуть відповідати бетону та деревині відповідно. Відстань між центрами мас перерізу позначення a , і воно визначається з умови ($a=a_1+a_2$). Всі інші геометричні характеристики показані на рис.2 .

Для визначення ефективної жорсткості на згин слід використовувати наступні формули; взяті з [5-10]:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + EA_1 \frac{\pi^2 \cdot s_i}{K_i \cdot l^2}}; \quad (3)$$

$$\gamma_2 = 1; \quad (4)$$

$${}_{ef} EI = EI_1 + EI_2 + a^2 \frac{EA_1 \cdot \gamma_1 \cdot EA_2}{EA_1 \cdot \gamma_1 + EA_2}. \quad (5)$$

Геометричні характеристики складеного перерізу:

$$EA_1 = E_{cm} \cdot h_1; \quad (6)$$

$$EI_1 = E_{cm} \cdot \frac{b \cdot h_1^3}{12}; \quad (7)$$

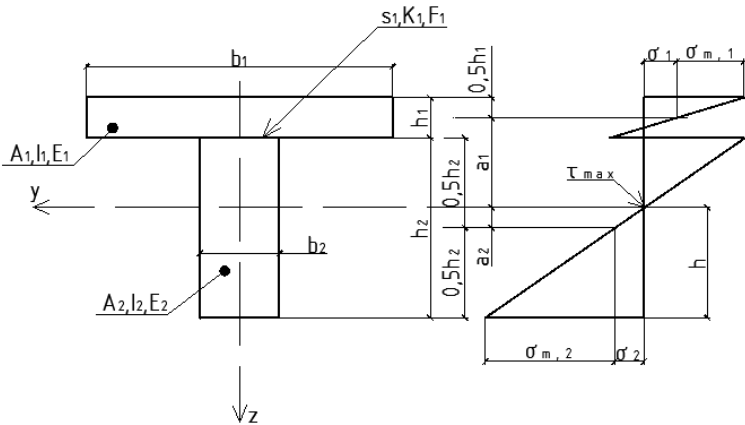


Рис. 4. Геометричні характеристики складеного перерізу

$$EA_2 = E_{0,mean} \cdot h_2; \quad (8)$$

$$EI_2 = E_{0,mean} \cdot \frac{b \cdot h_2^3}{12}. \quad (9)$$

Визначення відстаней до точки нульового напруження:

$$a_1 = a \frac{EA_2}{EA_1 \cdot \gamma_1 + EA_2}; \quad (10)$$

$$a_2 = a \frac{EA_1 \cdot \gamma_1}{EA_1 \cdot \gamma_1 + EA_2}. \quad (11)$$

Характеристики зсуву з'єднання:

$$k = \frac{K \cdot n}{s_i}; \quad (12)$$

де: K – модуль зсуву з'єднувальної системи; n – кількість елементів з'єднувальної системи в поперечному напрямку; s_i – відстань між ними в повздожньому напрямку

Визначення згинального моменту M_d та повздожніх зусиль:

$$M_{1d} = M_d \frac{EI_1}{ef EI}; \quad (13)$$

$$M_{2d} = M_d \frac{EI_2}{ef EI}; \quad (14)$$

$$N_{1d} = -N_{2d} = -\frac{M_d - M_{1d} - M_{2d}}{a}. \quad (15)$$

Розтягуючі та стискаючі зусилля в перерізах внаслідок усадки бетону ($t=\infty$):

$$N_{1,s} = F_0 - F_0 \left(1 + a^2 \frac{EA_2^2}{EA \cdot EI} \right) \frac{EA_1^2}{EA}, \quad (16)$$

де $F_0 = \varepsilon_{cs\infty} \cdot EA_1$ – утримуюча сила.

Згинальні моменти в розрахунковому перерізі з урахуванням повзучості:

$$M_s = F_0 \cdot a_1, \quad (17)$$

Перевірка нормальних напружень в бетонному перерізі:

$$\frac{\sigma_{1,R_0,d}}{\alpha \cdot f_{c,k} / \gamma_M} \leq 1. \quad (18)$$

Визначення напружень в деревинні:

$$\sigma_{2,t,d} = \frac{N_{2,d}}{A_2}; \quad (19)$$

$$\sigma_{2,m,d} = \sigma_{2,t,d} + \frac{M_{2,d}}{W_2}. \quad (20)$$

Для визначення зсуву виконуються наступні умови:

$$t_d = V_d \frac{EA_1 \cdot \gamma_1 \cdot a_1}{ef EI}. \quad (21)$$

Дотичні напруження в перерізі:

$$\tau_{\max,d} = V_d \frac{0,5 \cdot E_2 \cdot h^2}{ef EI}; \quad (22)$$

$$\text{де: } h = a_2 + \frac{h_2}{2}.$$

Перевірка міцності згідно DIN 1052 [2] та українських норм [11].
Нормальні напруження:

$$\frac{\sigma_{f,t,\max,d}}{f_{m,d}} \leq 1; \quad (23)$$

$$\frac{\sigma_{f,t,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1. \quad (24)$$

Дотичні напруження:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1. \quad (25)$$

Розрахунок за експлуатаційною придатністю (II групою граничних станів):

$$w_{Q,inst} \leq \frac{l}{300}; \quad (26)$$

$$w_{fin} - w_{G,inst} \leq \frac{l}{200}; \quad (27)$$

де:

$$w_{fin} = w_{G,fin} + w_{Q,fin} + w_{S,fin} = w_{g,inst} (1+k_{def}) + w_{Q,inst} (1+\psi_{2,1} k_{def}) + w_{S,fin}. \quad (28)$$

Перевірка прогинів при квазі-постійному навантаженні:

$$w_{fin} - w_0 \leq \frac{l}{200}; \quad (29)$$

де:

$$w_{fin} = w_{G,fin} + w_{Q,fin} + w_{S,fin} = w_{g,inst} (1+k_{def}) + w_{Q,inst} \psi_{2,1} (1+k_{def}) + w_{S,fin}. \quad (30)$$

Визначення коефіцієнта деформації k_{def} для складеного поперечного перерізу слід виконувати за формулою:

$$k_{def} = \frac{ef EI_{t=0}}{ef EI_{t=\infty}}. \quad (31)$$

Приклад розрахунку плити. Розрахунок здійснюємо згідно нормативних документів DIN 1052:2004-08 [2] та DIN 1045-1:2001-07 [3]. Для розрахунку приймаємо суцільну композитну систему із застосуванням CLT-панелі. Геометричні характеристики та навантаження заданої конструкції показані на рис. 5.

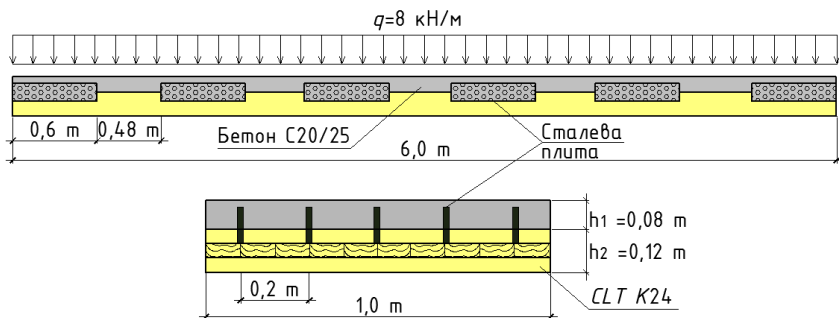


Рис. 5. Поперечний та повздовжній розрізи композитної плити

Основні характеристики матеріалів та з'єднувальних засобів приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики матеріалів

Матеріал	Граничні стани	($t=0$)	($t=\infty$)
E_{wood} (МПа)	I, II	11000	(2/3)11000=7333
E_{beton} (МПа)	I, II	28800	28800/3,5=8230
K_{ser} (МН/М)	I	0,825·600=495	0,5·495=248
	II	2/3·495=330	0,5·330=165

Перевірка напружень у перерізі із дерева задовільняє для нормальних напружень умовам (23, 24), для сколюючих напружень умові (25).

Напруження в гвинті зєднувальної системи перевіряємо за формулою:

$$\frac{F_d}{T_d} \leq 1. \quad (32)$$

Таблиця 3

Визначення жорсткості елементів

Матеріал		Деревина	Бетон	З'єднувальний елемент
EA (МН)	$(t=0)$	1320	2300	—
	$(t=\infty)$	880	660	
		1540		
EI (МН м ²)	$(t=0)$	1,23	1,58	—
	$(t=\infty)$	1,05	1,35	
		5,17		
eI (МН м ²)	$(t=0)$	I	10,21	
		II	10,33	
	$(t=\infty)$	I	4,67	
		II	4,89	

Таблиця 4

Визначення коефіцієнтів γ_1 та k для розрахунку з'єднувального елемента

γ_1	$(t=0)$	I	0,732
		II	0,76
	$(t=\infty)$	I	0,826
		II	0,88
k (МН/м ²)	$(t=0)$	I	1720
		II	2578
	$(t=\infty)$	I	860
		II	1290

Бетонний переріз задовільняє умові розрахунку (16), для сприйняття остаточних можливих напружень встановлюємо конструктивну арматуру.

Таблиця 5

Розрахункові зусилля та напруження у бетоні та деревині

Матеріал		Деревина	Бетон
Згинальний момент M (кНм)	$(t=0)$	5,57	4,34
	$(t=\infty)$	10,38	4,46
Повздожня сила N (кН)	$(t=0)$	-260	260
	$(t=\infty)$	-221,35	221,35
Нормальні напруження σ (МПа)	$(t=0)$	$\sigma_{2,t,d} = 2,17$	$\sigma_{1,R0,d} = -7,32$
	$(t=\infty)$	$\sigma_{2,t,d} = 1,25$	$\sigma_{1,R0,d} = -6,02$
	$(t=0)$	$\sigma_{2,m,d} = 4,49$	$\sigma_{1,Ru,d} = 0,82$
	$(t=\infty)$	$\sigma_{2,m,d} = 6,18$	$\sigma_{1,Ru,d} = 0,46$
Дотичні напруження $\tau_{max,d}$ МПа	$(t=0)$	0,19	
	$(t=\infty)$	0,19	

Таблиця 6

Розрахункові зусилля та напруження у з'єднувальному елементі

t_d (кНм)	$(t=0)$	192,6
	$(t=\infty)$	183
F_d (кН)	$(t=0)$	35,1
	$(t=\infty)$	35,7
T_d (кН)	$(t=0)$	66,5
	$(t=\infty)$	66,5

Таблиця 7

Результати розрахунку за 2 граничним станом

$(t=0)$	$(t=\infty)$
$w_{G,inst} = 8,00 \text{ mm}$	$w_{G,inst} = 8,00 \text{ mm}$
$w_{Q,inst} = 3,27 \text{ mm}$	$w_{Q,inst} = 20 \text{ mm}$
—	$w_{fin} = 29,32 \text{ mm}$

Таким чином прийнята в прикладі конструкція дерев'яно-бетонної плити задовільняє вимогам розрахунку.

Переваги застосування дерев'яно-бетонних плит: низька вага конструкції у порівнянні з аналогами з залізобетону, чи комбінованих залізобетонних плит по металевим балкам; значно покращуються пожежостійкість будівель з дерев'яним каркасом; мають високі показники

за шумоізоляцією; збільшується несуча здатність у порівнянні з традиційними плитами з дерев'яними настилами чи перехресно-клеєдощатими панелями; можливість використання незнімної опалубки що включається в роботу перерізу; скорочення термінів виконання будівельно-монтажних робіт.

Висновки:

1. За результатами проведеного дослідження, продемонстровано основні теоретичні положення розрахунку дерев'яно-бетонних композитних плит та наведено приклад розрахунку цієї конструкції.

2. Основою розрахунку дерев'яно-бетонних композитних плит є γ -метод, який базується і виведений для розрахунку складених балок. Застосування γ -методу для розрахунку композитних плит викликає багато питань і потребує ретельного подальшого вивчення.

3. Встановлено, що дерев'яно-бетонні композитні плити є сучасним і перспективним будівельним виробом, що заслуговує на широке впровадження в будівництво.

1. Rautenstrauch, K.: Entwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise. In: Holz-Beton Verbund, Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus der Praxis und Wissenschaft; Herausgeber: König, G., Holschmacher, K., Dehn, F.; Bauwerk Verlag GmbH, Berlin 2004. – 126 p. 2. DIN 1052:2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. 2004. – 235 p. 3. DIN 1045-1:2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion 2001. – 257 p. 4. Rautenstrauch, K.; Grosse, M.; Lehmann, S.; Hartnack, R.: Baupraktische Dimensionierung von Holz-Beton-Verbunddecken. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau; Bauhaus-Universität Weimar; 6. Informationstag des IKI; Oktober 2003. – 374 p. 5. Kreuzinger, H.; Scholz, A.: Flächentragwerke – Berechnung und Konstruktion. AiF Forschungsvorhaben, Schlussbericht, TECHNISCHE UNIVERSITÄT München, 2003. – 437 p. 6. Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A.: Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbund-Decken. AiF-Forschungsvorhaben, TECHNISCHE UNIVERSITÄT München 2007. – 323 p. 7. Rautenstrauch, K.; Döhler, A.: Weiterentwicklung der Holz-Beton-Verbundbauweise unter Einsatz von blockverleimten Brettschichtholz querschnitten bei Straßenbrücken. Zwischenbericht zum AiFForschungsvorhaben Nr. 14275 BR. Bauhaus-Universität Weimar. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Professur Holz- und Mauerwerksbau. 2007. – 233 p. 8. Döhler, A.; Rautenstrauch, K.: Hybridbrücken mit blockverleimten Brettschichtholz. Bautechnik 8, Heft 06; Ernst & Sohn Verlag, Berlin. 2006 – 344 p. 9. Die Holz-Beton-Verbunddecke mit den BVD-Verbundankern Typ VA1 - Bemessungstabelle; Bertsche System GmbH, Prackebach, Deutschland. 2011 – 54 p. 10. Holz-Beton-Verbundsystem mit eingeklebten HBV-Schubverbindern, Bathon & Bahmer GbR, Glattbach, Deutschland; Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin. 2014 – 109 p. 11. ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції. Основні положення.» / Фурсов В.В., Михайловский Д.В., Найчук А.Я. та інші // - Київ, "Укрархбудінформ" 2017. – 125 с.