

С.І. САХНО, Л.А. ЯНОВА, О.В. ПИЩИКОВА, кандидати техн. наук, доценти,
А.Є. МАНЬКО, К.С. ПИЩИКОВА, студенти
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ П'ЯТИПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ З CLT ПАНЕЛЕЙ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Дослідження особливостей напружено-деформованого стану каркасу багатоповерхової будівлі з клеєної деревини методом скінчених елементів.

Методи досліджень. Математичне моделювання деформацій та напружень в елементах каркасу виконувалось в програмному середовищі ANSYS Student. Аналіз напружено-деформованого стану елементів моделі з урахуванням ортотропних властивостей матеріалу. Модальний аналіз конструкції будинку.

Наукова новизна. В результаті досліджень отримав подальший розвиток метод математичного моделювання конструкцій виготовлених з ортотропних матеріалів. Виявлені особливості розподілення напружень та деформацій в конструкціях з CLT панелей.

Практичне значення. Моделювання напружено-деформованого стану конструкцій з ортотропного матеріалу дозволяє виконувати розрахунки та оптимізацію конструкції будинків та споруд з деревини за допомогою програмного комплексу ANSYS. Показано, що CLT панелі є перспективними для застосування в багатоповерховому будівництві в Україні.

Результати. В результаті досліджень виявлені особливості роботи багатоповерхового будинку з CLT панелей. Панелі мають високу міцність та жорсткість і можуть бути використані для будівництва багатоповерхових будинків. Проведено підбір оптимальної товщини міжповерхового перекриття. Виявлено особливості роботи силового каркасу першого поверху який складається з колон та балок з клеєної деревини та центральним ядром з CLT панелей. Найбільші відносні деформації спостерігаються у колонах першого поверху та у місцях примикання стінових панелей до перекриття. Найбільші напруження виникають у конструкції покрівлі, колонах першого поверху та у місцях з'єднання міжкімнатних перегородок верхнього поверху з підвітряної сторони будівлі. Показано, що CLT панелі забезпечують достатню стійкість конструкції при зменшенні її загальної ваги. Модальний аналіз будинку показав, що форма коливань та амплітуда відхилень конструкції значною мірою залежить від жорсткості колон першого поверху. Результати досліджень показують, що найбільш небезпечними є четверта та п'ята форми коливань із частотами, відповідно 16,9 та 17,2 Гц.

Ключові слова: деревина, метод скінчених елементів, деформації, міцність, CLT панелі.

doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-76-83

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Одним з найважливіших завдань сучасного світу є зниження викидів вуглекислого газу в атмосферу [1]. Будівельна промисловість є одним із основних джерел викидів [2]. Так, частка вуглекислого газу, що утворюється тільки при виробництві цементу, становить 8% від загального обсягу світових викидів [3, 4]. Одним із способів зниження викидів є застосування у будівництві екологічно чистих конструкційних матеріалів, одним з яких є деревина.

Деревина у будівництві застосовується давно, але її роль як будівельного матеріалу з часом лише збільшується. У порівнянні з іншими конструкційними матеріалами деревина має безліч переваг, починаючи від нижчої вартості, підвищеної енергоефективності та меншої дії на навколишнє середовище і закінчуючи унікальними варіантами дизайну. Набувають все більшої популярності такі конструкційні матеріали з деревини як глулам (клеєний брус) [5] та CLT панелі (cross laminated timber) [6]. Дані матеріали використовуються як конструктивні елементи в каркасах багатоповерхових будівель, шкіл, дитячих садків, виробничих приміщень, житлових будинків та спеціальних споруд. Панелі CLT, X-Lam, масивний брус – це загальні назви листових матеріалів, панелей, стійок та балок, виготовлених з клеєних дошок або дошок, укладених поперемінно під прямим кутом.

CLT панелі в основному використовуються для стін та підлог. Це екологічно чистий та придатний для повторного використання будівельний матеріал, який за умови правильного використання має тривалий термін служби. Відмінною рисою конструктивних елементів CLT, таких як стіни та підлоги, є те, що вони часто застосовуються як панелі з великою поверхнею. Можливість великих поперечних перерізів надає компонентам високу несучу здатність і жорсткість, що робить панелі корисними для стабілізації будівлі [7]. Панелі можуть бути виготовлені

з високим ступенем заводського виготовлення, а їхня мала власна вага дає переваги при виконанні земляних робіт, транспортуванні та монтажу. Ізоляція зовнішніх стін практично суцільна без теплових мостів. Міцна конструкція та сучасні облицювальні матеріали забезпечують надійну пожежну безпеку.

Сучасні технології виробництва в поєднанні з хорошими характеристиками міцності роблять CLT панелі затребуваним будівельним матеріалом з такими унікальними властивостями як:

висока міцність по відношенню до власної ваги матеріалу.

невеликі виробничі допуски та гарна розмірна стабільність.

хороша несуча здатність при пожежі.

гарна теплоізоляційна здатність.

низька власна вага, що означає нижчі транспортні та монтажні витрати, а також нижчі витрати на фундамент.

хороша стійкість до хімічно агресивних середовищ.

гнучке виробництво, що дозволяє виготовляти навіть криволінійні поверхні.

Аналіз досліджень і публікацій. Для оптимізації витрат при проектуванні та зведенні будівель та споруд застосовуються CAD-системи, що дозволяють суттєво знизити витрати матеріалів та зменшити вагу будівлі. Розрахунок сучасних конструкцій з деревини в Україні має виконуватись відповідно до ДБН В.2.6–16 1:2017 [8]. Однак при підготовці даних будівельних норм було допущено ряд суттєвих помилок [9], які не дозволяють використовувати цей документ для реалізації відповідних розрахунків такими загальноприйнятими CAD-системами як SCAD та Lira.

Постановка задачі. У зв'язку з викладеним було поставлено завдання моделювання напружено-деформованого стану силового каркасу багатопверхового будинку з глуламу та CLT панелей методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS.

Програмний комплекс ANSYS призначено для вирішення широкого кола інженерних завдань, пов'язаних зі статичними та динамічними впливами на конструкції, термодинамікою, динамікою рідин та газу, та безлічі інших завдань. Для проведення досліджень використовувалася навчальна версія програми ANSYS Student.

Викладення матеріалу та результати. Як об'єкт досліджень було прийнято 5-ти поверховий житловий будинок з комерційними приміщеннями на першому поверсі. В якості огорожувальних конструкцій та конструкцій перекриття прийняті CLT – панелі, а для колон і балок першого поверху прийняті клеєні конструкції (глулам).

Габарити будинку в плані 21,1×18,0 м, висота будинку 17,7 м. Типова схема житлового поверху та його математична модель наведена на рис. 1. Товщина зовнішніх несучих стін прийнята 180 мм виходячи з умов теплоізоляції, товщина внутрішніх перегородок прийнята 100 мм виходячи з умов звукоізоляції. Початкова товщина перекриття прийнята 200 мм і у процесі оптимізації була зменшена до 100 мм. Житлові поверхи спираються на каркас першого поверху, який утворюється колонами з глуламу перетином 300×400 мм і 200×400 мм і балками 8000×200×500 мм. Верхня та нижня об'язка зовнішніх колон виконана CLT панелями завтовшки 180 мм.

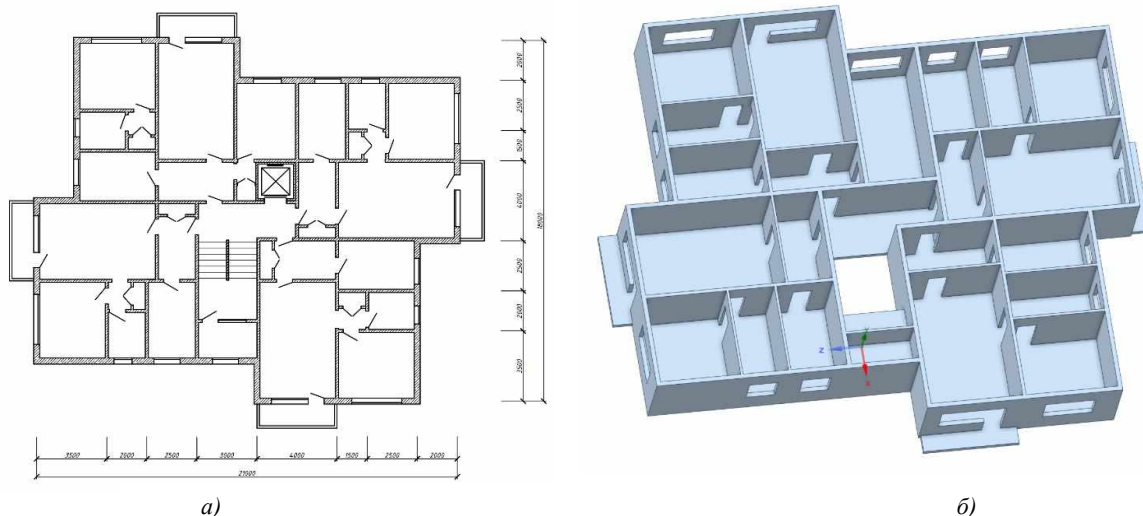


Рис. 1. Типова схема: а - математична модель; б - житлового поверху

При моделюванні враховувалися такі розрахункові навантаження та впливи на будівлю:
 власна вага всіх елементів та конструкцій;
 рівномірно розподілене навантаження на перекриття та покриття $1,5 \times 10^{-3}$ МПа;
 снігове навантаження на покрівлю $1,11 \times 10^{-2}$ МПа;
 вітрове навантаження на стіни 2-5 поверхів $8,4 \times 10^{-4}$ МПа;
 вітрове навантаження першого поверху з урахуванням горизонтальних зусиль від скління на крайні колони $3,7 \times 10^{-3}$ МПа, на середню колону $7,3 \times 10^{-3}$ МПа.

Схему каркасу першого поверху наведено на рис. 2. Схему розподілу навантажень наведено на рис. 3. У програмному комплексі ANSYS змодельована математична модель нелінійно-статичного розрахунку, з урахуванням усіх граничних умов, розрахунок проводився за нормальних умов, з температурою середовища $+20^\circ\text{C}$.

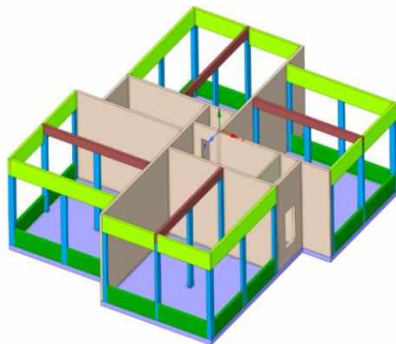


Рис. 2. Схему каркасу першого поверху будівлі

Copy of Static Structural_small mesh
 Static Structural
 Time: 0.33902 s
 Standard Earth Gravity: 9086.6 mm/s²
 Pressure: 1.5e+003 MPa
 Pressure: 3.84e+004 MPa
 Pressure: 4.37e+003 MPa
 Pressure: 2.11e+003 MPa
 Pressure: 5.73e+003 MPa
 Fixed Support

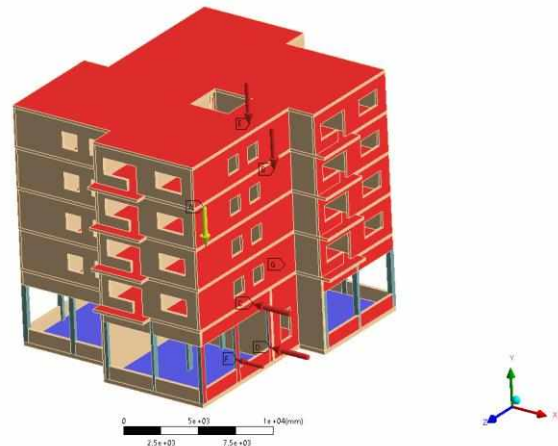


Рис. 3. Математична модель будівлі та схема розподілу навантажень

У математичній моделі всі елементи жорстко з'єднані між собою (contact type – bonded), фундамента плита жорстко закріплена у просторі. Розрахунок проводився з урахуванням ортотропних властивостей деревини. Як матеріал для CLT панелей та глуламу прийнята деревина класу C24. Властивості CLT панелей та глуламу наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення щільності, міцності та жорсткості CLT панелей C24 та клеєної деревини GL24h

Параметр	CLT C24		GL24h	
Щільність [кг/м ³]	420		380	
Ортотропна пружність [МПа]				
Модуль пружності, X $E_{0,x,mean}$	11000		11600	
Модуль пружності, Y $E_{0,y,mean}$	11000		390,0	
Модуль пружності, Z $E_{0,z,mean}$	400,0		390,0	
Коеф. Пуасона	0,4		0,4	
Модуль зсуву XY $G_{090,slav,mean}$	690,0		0,4	
Модуль зсуву YZ $G_{090,slav,mean}$	50,0		0,4	
Модуль зсуву XZ $G_{090,slav,mean}$	50,0		720,0	
Ортотропна міцність [МПа]				
	характеристичні	розрахункові	характеристичні	розрахункові
Розтяг X, $f_{t,0,x,k}$	14,5	6,96	16,5	7,92
Розтяг Y, $f_{t,0,y,k}$	14,5	6,96	0,4	0,192
Розтяг Z, $f_{t,90,x,k}$	0,4	0,192	0,4	0,192
Стиск X, $f_{c,0,x,k}$	-21,0	-10,08	-24,0	-11,52
Стиск Y, $f_{c,0,y,k}$	-21,0	-10,08	-2,7	-1,296
Стиск Z, $f_{c,90,z,k}$	-2,50	-1,2	-2,7	-1,296
Зсув XY, $f_{v,090,slav,k}$	4,0	1,92	2,7	1,296
Зсув YZ, $f_{v,090,slav,k}$	1,1	0,528	1,1	0,528
Зсув XZ, $f_{v,9090,slav,k}$	1,1	0,528	1,1	0,528

На першому етапі досліджень перевірялися деформації та напруження у конструкції будівлі. Оскільки досліджувався будинок цілком, у результаті розрахунків було отримано як загальні деформації будівлі загалом (рис. 4), і відносні деформації його конструкційних елементів (рис. 5).

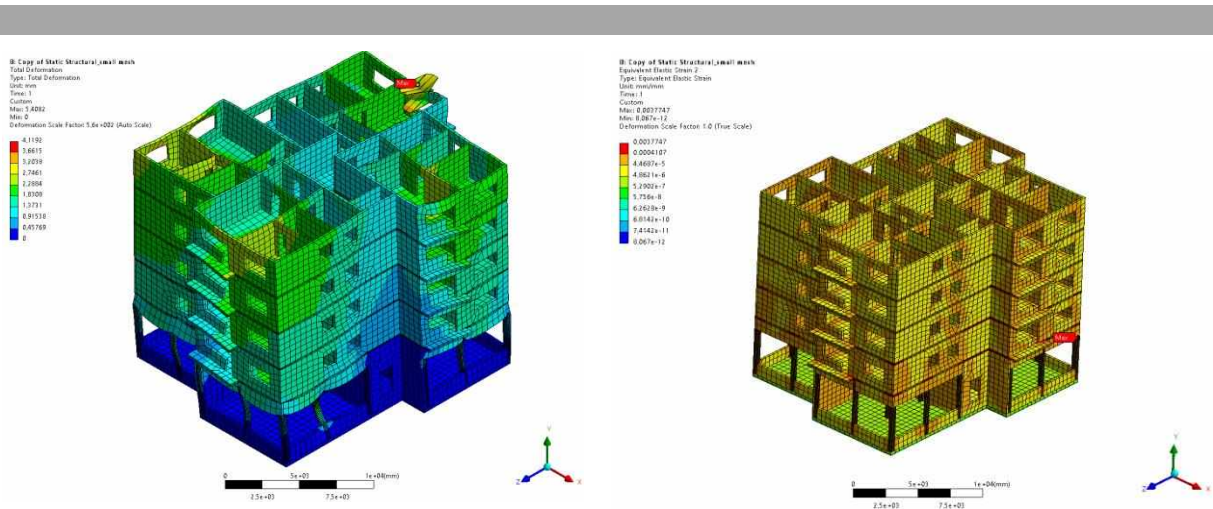


Рис. 4. Загальна деформація елементів будівлі.
На малюнку деформації збільшено у 560 разів.
Покриття умовно не показано

Рис. 5. Відносні деформації елементів будівлі.
Покриття умовно не показано

Аналіз результатів показує, що в цілому деформації будівлі не перевищують допустимих значень. У той же час для забезпечення рівня допустимих деформацій окремі елементи вимагають посилення. До таких елементів відноситься перемички над балконним отвором п'ятого поверху. Вертикальні деформації у цьому місці перевищують 2 мм (рис. 6 а), а горизонтальні 3 мм (рис. 6 б). У процесі подальшого коригування проекту, у цьому місці необхідно передбачити посилення.

Найбільші відносні деформації спостерігаються у колонах першого поверху та у місцях примикання стінових панелей до перекриття. При цьому максимальні значення відносних деформацій не перевищують 37×10^{-3} мм.

Аналіз конструктивних елементів будівлі показує, що найбільші напруження виникають у конструкції покрівлі, колонах першого поверху (рис. 6 а) та у місцях з'єднання міжкімнатних перегородок верхнього поверху з підвітряної сторони будівлі (рис. 6, б). При цьому напруження не перевищують 6,7 МПа, що нижче за розрахункову міцність 6,96 МПа (рис. 7 а, б).

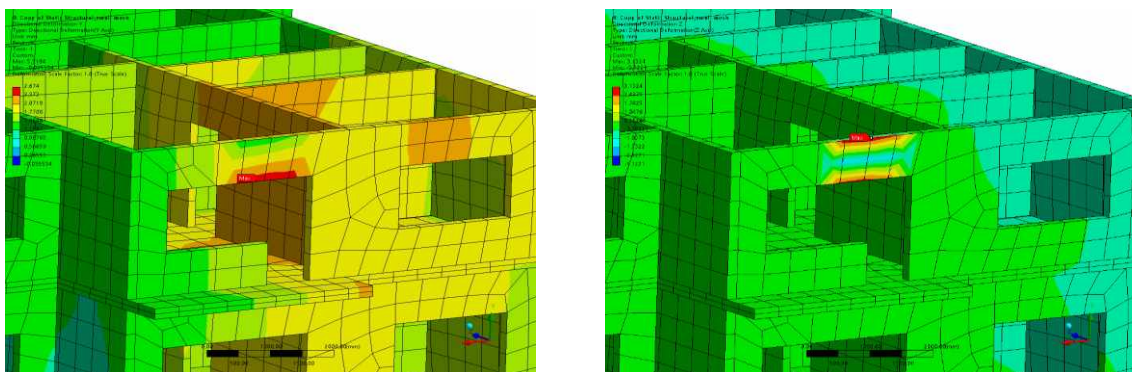


Рис. 6. Деформація в ділянці перемички балконного отвору: а – по вертикалі (Y); б – по горизонталі (Z)

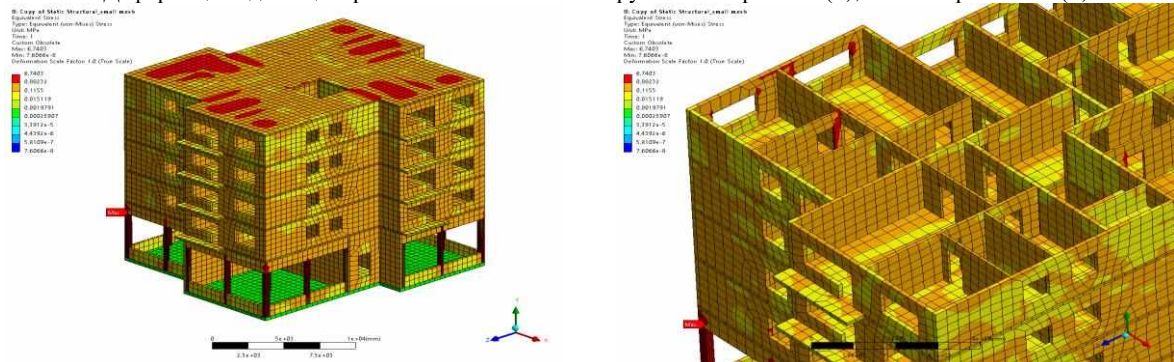


Рис. 7. Еквівалентні напруження (von-Mises) у конструктивних елементах будівлі: а – напруження у покритті та колонах; б – напруження у стиках внутрішніх перегородок верхнього поверху

Зважаючи на те, що максимальні вертикальні навантаження припадають на конструктивні елементи першого поверху, напруження в цих елементах досліджені окремо (рис. 8).

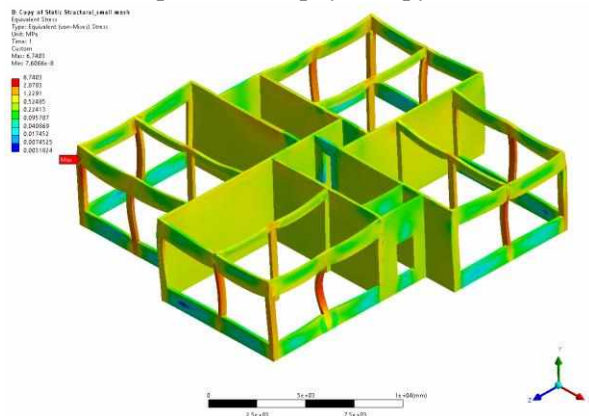


Рис. 8. Еквівалентні напруження у конструктивних елементах першого поверху

Аналіз показує, що найбільші напруження виникають у зовнішніх колонах. Однак їх величина - 6,7 МПа значно нижча за межу міцності GL24h вздовж волокон - 11,52 МПа.

Відомо, що в довгих конструктивних елементах, що працюють на стиск, втрата несучої здатності частіше відбувається не за рахунок міцності, а за рахунок втрати стійкості. У зв'язку з цим було проведено перевірку колон на стійкість. Розрахунок стійкості вівся

з урахуванням отриманих раніше максимальних напружень. Усього було розглянуто 5 форм втрати стійкості. Результати наведено у табл. 2 та рис. 9.

Таблиця 2

Значення запасу по навантаженню до втрати стійкості колон першого поверху будівлі

Форми втрати стійкості	Кратність запасу по навантаженню до втрати стійкості (load multiplier for buckling)
1	18,139
2	20,302
3	21,672
4	22,161
5	22,313

Результати показують, що при прийнятій схемі завантаження найменшу стійкість має середня зовнішня колона правого блоку будівлі (рис. 9). Однак і вона має вісімнадцяти кратний запас стійкості навантаження. Таким чином, моделювання показало, що прийняті розміри конструктивних елементів забезпечують достатню міцність та стійкість каркасу будівлі.

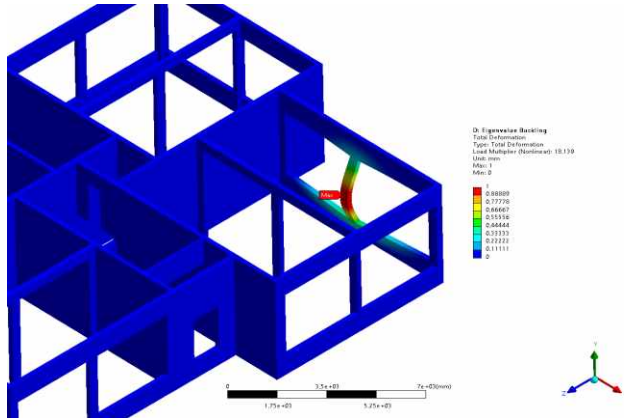


Рис. 9. Деформація колони для першої форми втрати стійкості

З метою оптимізації конструкції будівлі в роботі проведено аналіз деформацій та напружень міжповерхових перекриттів за різних їх товщин. Товщина плит перекриття та балконів змінювалася від 200 до 50 мм, товщина плити сходового майданчика – від 220 до 70 мм. Крок зміни розмірів – 20 мм. Окремі результати моделювання наведено в табл. 3, а їхня візуалізація при товщині плити перекриття 50 мм на рис. 10 і 11.

Таблиця 3

Деформації та напруження в елементах перекриття при різних товщинах CLT плит

Найменування параметрів		Точки проєктування								
		ПТ 1	ПТ 3	ПТ 5	ПТ 7	ПТ 9	ПТ 11	ПТ 13	ПТ 15	ПТ 16
Товщина [mm]	перекриття і балконів [mm]	200	180	160	140	120	100	80	60	50
	сходової площадки [mm]	220	200	180	160	140	120	100	80	70
Вертикальні деформації [мм]	перекриття	0,63	0,80	1,05	1,44	2,08	3,24	5,71	12,74	20,82
	сходової площадки	1,22	1,54	2,00	2,70	3,84	5,85	9,77	18,64	27,48
	балконів	1,48	1,48	1,51	1,54	1,62	1,73	2,15	4,89	8,24
Еквівалентні напруження max [МПа]	в перекритті	2,06	2,48	3,15	4,11	5,55	7,85	11,82	19,62	26,78
	в сходовій площадці	2,03	2,50	3,15	4,09	5,52	7,83	12,05	20,57	28,42
	в балконах	2,97	3,05	3,07	3,16	3,14	3,39	3,55	6,00	8,72
Нормальні напруження [МПа]	min	-2,60	-2,59	-2,65	-2,69	-3,83	-6,14	-10,66	-20,60	-30,14
	max	3,41	3,51	3,49	3,58	3,50	4,35	6,47	13,51	22,24
Напруження зсуву [МПа]	min	-0,21	-0,23	-0,24	-0,28	-0,42	-0,66	-1,07	-1,60	-1,82
	max	0,55	0,64	0,77	0,94	1,17	1,47	1,86	2,71	3,41

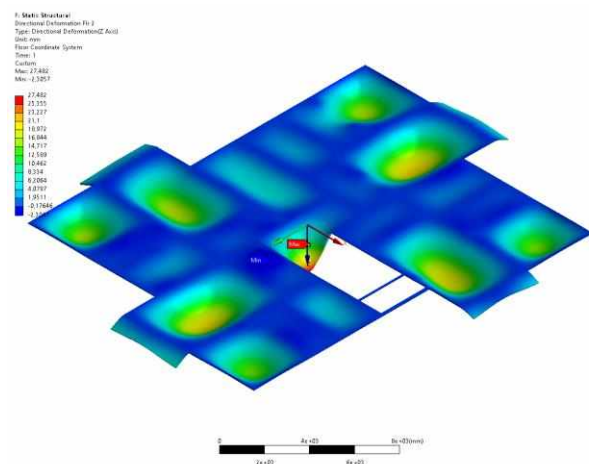


Рис. 10. Деформації перекриття товщиною 70 мм

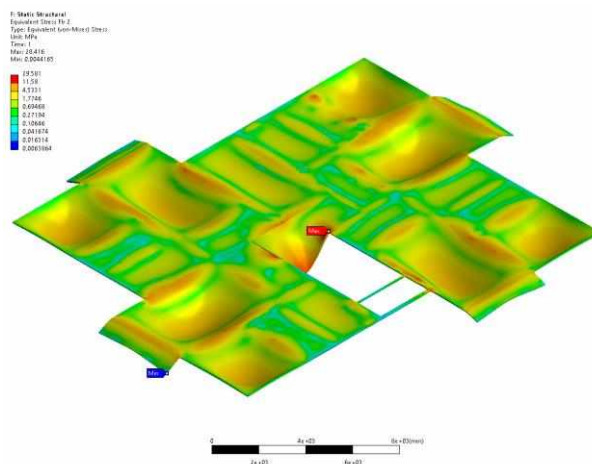


Рис. 11. Напруження в перекритті товщиною 70 мм

Згідно з нормативами максимально допустимий прогин не повинен перевищувати $1/300$ розміру конструкції. При чистому прольоті 3840 мм проліт плит перекриття не повинен перевищувати 12,8 мм. Ця умова виконується вже при товщині плити 70 мм, але напруження стиску в CLT плиті при цьому складають 14,6 МПа, при допустимих 10,1 МПа, а напруження розтягу 8,5 МПа, при допустимих 6,96 МПа. Напруження зсуву в площині XY становлять 2,2 МПа за допустимих 1,92 МПа, що може призвести до розшарування плити. Таким чином, при товщині плити перекриття 70 мм умови міцності не дотримуються. Найближчою товщиною плити перекриття, при якій всі значення напружень і деформацій знаходяться в допустимих межах є 100 мм, тому для створення перекриття в даній будівлі доцільно застосовувати CLT плити товщиною 100 мм.

Для сходового майданчика оптимальною є товщина 120 мм, а консольних елементів балконів – 100 мм.

Численні дослідження довели, що дерев'яні конструкції відповідають найсуворішим вимогам до проектування з урахуванням сейсмічних впливів [10-12]. Більшість пошкоджень від землетрусів спричинена сейсмічними хвилями, які змушують фундамент будівлі коливатися. Сили, що виникають при землетрусі, пропорційні вазі конструкції. Загальна величина сил, викликаних землетрусом, яким має протистояти будівля, менше для більш легких будівель, а будівлі з деревини значно легші, ніж будинки з інших звичайних будівельних матеріалів. Дерев'яні будівлі, як правило, мають безліч з'єднань, тому у них більше шляхів розподілу навантаження, і менша ймовірність того, що конструкція впаде, якщо деякі з'єднання вийдуть з ладу [13]. Ці численні з'єднання також надають дерев'яним спорудам притаманну їм пластичність.

Для будівель, що експлуатуються в умовах сейсмічних впливів, важливим є знання власних частот і форм коливань конструкції. У зв'язку з цим для розглянутої будівлі було проведено модальний аналіз каркасу. Усього здійснено пошук перших шести мод власних коливань будівлі. Результати аналізу наведено в табл. 4 та на рис. 12.

Результати досліджень показують, що найбільш небезпечними є четверта та п'ята форми коливань із частотами, відповідно 16,9 та 17,2 Гц. У четвертій формі спостерігається максимальна кінетична енергія каркаса і, відповідно, найбільші напруження в конструкції. Для п'ятої форми характерні максимальні відхилення каркаса від нормального стану.

Таблиця 4

Частоти власних коливань, модальні маси, кінетична енергія, ефективні маси, максимальні повні деформації та напруження будівлі

Форма	Частота [Гц]	Модальна маса	Кінетична енергія [Дж]	Ефективна маса			Макс. повні деформації [мм]	Макс. еквівалентні напруження [МПа]
				X	Y	Z		
1	3,6819	113.1	0.3028E+05	0.7143E-01	0.7877E-03	0.1006E-01	0,107	0,106
2	5,6515	180.2	0.1136E+06	238.4	0.7634E-04	27.91	0,070	0,061
3	5,6805	184.4	0.1175E+06	27.50	0.1879E-03	241.1	0,078	0,066
4	16,909	91.52	0.5165E+06	15.27	0.2469E-01	0.7848E-01	0,115	0,313
5	17,21	76.00	0.4443E+06	0.9946E-01	0.3053	12.88	0,120	0,227
6	18,06	67.16	0.4324E+06	0.7252E-01	4.121	1.251	0,106	0,275

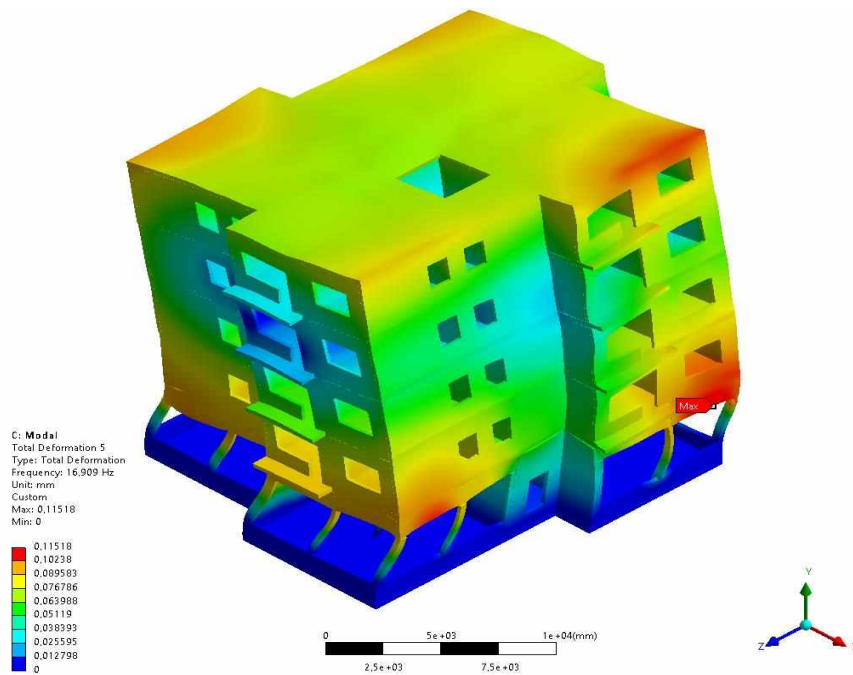


Рис. 12. Характер деформацій будівлі за четвертої форми власних коливань

Модальний аналіз будинку показав, що форма коливань та амплітуда відхилень значною мірою залежить від жорсткості колон першого поверху.

Отримані результати можуть бути використані у подальших розрахунках на сейсмічні дії.

Висновки та напрямок подальших досліджень. В результаті досліджень виявлені особливості роботи Багатоповерхового будинку з CLT панелей. Панелі мають високу міцність та жорсткість і можуть бути використані для будівництва багатоповерхових будинків. Проведено підбір оптимальної товщини міжповерхового перекриття. Виявлено особливості роботи силового каркасу першого поверху який складається з колон та балок з клеєної деревини та центральним ядром з CLT панелей. Найбільші відносні деформації спостерігаються у колонах першого поверху та у місцях примикання стінових панелей до перекриття. Найбільші напруження виникають у конструкції покрівлі, колонах першого поверху та у місцях з'єднання міжкімнатних перегородок верхнього поверху з підвітряної сторони будівлі.

Модальний аналіз будинку показав, що форма коливань та амплітуда відхилень значною мірою залежить від жорсткості колон першого поверху. Оскільки пружний в горизонтальній площині зв'язок між каркасом будинку та фундаментом може надати каркасу першого поверху функцію сейсмоізолюючого опорного елемента, в подальших дослідженнях необхідно проаналізувати вплив жорсткості силової обв'язки першого поверху на сейсмічну стійкість будинку.

Список літератури

1. Chen, L. (2021). Environmental cost of sustainable development and climate change: can SAARC shift some liability with renewable energy and efficiency? *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15209-2>
2. Chen, J., Shi, Q., & Zhang, W. (2022). Structural path and sensitivity analysis of the CO₂ emissions in the construction industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106679>
3. Miller, S. A., Habert, G., Myers, R. J., & Harvey, J. T. (2021). Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies. *One Earth*, 4(10). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.011>
4. Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. In *International Journal of Sustainable Built Environment* (Vol. 1, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>
5. Hajihassani, R., Ghahri, S., Zamani, S. M., & Nourbakhsh, A. (2022). Performance of densified wood glulam as building bio-material. *Journal of Renewable Materials*, 10(2). <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017781>
6. Masroor, M., Doudak, G., & Casagrande, D. (2022). Design of Multipanel CLT Shear Walls with Bidirectional Mechanical Anchors Following Capacity-Based Design Principle. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 36(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001693](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001693)

7. Zhang, X., Pan, Y., & Tannert, T. (2021). The influence of connection stiffness on the dynamic properties and seismic performance of tall cross-laminated timber buildings. *Engineering Structures*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112261>

8. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – Київ : Місррегіон України, 2017. – 111 с.

9. Sakhno, Serhiy and Yanova, L. and Pishchikova, O. V., Суттєві помилки в ДБН В.2.6-161:2017 «дерев'яні конструкції основні положення» та їх можливі наслідки (Significant Mistakes in DBN V.2.6–161: 2017 'Wooden Constructions Basic Provisions' and Their Possible Consequences) (February 15, 2020). Гірничий вісник ДВНЗ «Криворізький національний університет», 105, p. 127-132, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3538659>

10. Xue, J., Xu, D., & Qi, L. (2019). Experimental seismic response of a column-and-tie wooden structure. *Advances in Structural Engineering*, 22(8). <https://doi.org/10.1177/1369433219828647>

11. Shimizu, H., Wakashima, Y., Shimizu, H., & Kitamori, A. (2020). Seismic retrofit of traditional wooden structures by development of a seismic grid wall with high initial stiffness. *AIJ Journal of Technology and Design*, 26(63). <https://doi.org/10.3130/aijt.26.537>

12. Alih, S. C., & Vafaei, M. (2019). Performance of reinforced concrete buildings and wooden structures during the 2015 Mw 6.0 Sabah earthquake in Malaysia. *Engineering Failure Analysis*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.056>

13. Gustafsson Anders, Crocetti Roberto, Just Alar, Landel Pierre, Olsson Jörgen, Pousette Anna, Silfverhielm Magnus, & Östman Birgit. (2019). *The CLT Handbook* (E. Borgström & J. Fröbel, Eds.). Skogsindustrierna Svenskt Trä.

Рукопис подано до редакції 16.03.2022

УДК 624.153.524

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Д.А. КРИШКО, канд. техн. наук, ст. викл.,
В.О. САВЕНКО, канд. техн. наук, молод. наук. співроб., А.В. БОЛОТНИКОВ, магістрант
Криворізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ РІШЕНЬ ФУНДАМЕНТІВ З ВИРІВНЮВАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ, ЯКІ ЗВОДЯТЬСЯ НА ОСНОВАХ, ЩО НЕРІВНОМІРНО ДЕФОРМУЮТЬСЯ

Мета. У зв'язку з підвищенням дефіциту вільних земельних ділянок під забудову, в умовах зростання обсягів капітального будівництва, виникає необхідність використання територій зі складними інженерно-геологічними умовами. Неоднорідність деформаційно-міцнісних властивостей ґрунтових основ призводить до перенапруження в розрахункових перерізах конструкцій фундаментів та нерівномірності їх осідань, відповідно зменшуючи міцність та довговічність окремих частин та будівлі в цілому. При проєктуванні будівель та споруд у таких інженерно-геологічних умовах передбачаються спеціальні заходи, що забезпечують необхідні експлуатаційні якості та довговічність об'єктів. Метою досліджень є аналіз існуючих та пошук нових конструктивних рішень фундаментів з вирівнювальними властивостями, які зводяться на основах, що нерівномірно деформуються.

Методи дослідження. В даний час можна виділити низку загальних принципів розвитку, вдосконалення та оптимізації фундаментних конструкцій: зниження маси фундаментів та витрати матеріалів на одиницю несучої здатності; зниження трудомісткості їх улаштування; створення конструкцій, що дозволяють залучити до роботи максимальний обсяг ґрунту та отримати більш рівномірний напружено-деформований стан масиву ґрунту в основі фундаментів та знизити концентрацію напружень на кордоні «фундамент – основа»; розробка та уточнення розрахункових схем ґрунтових основ.

При виконанні досліджень були застосовані методи аналізу, синтезу та порівняння сучасних технічних рішень фундаментів з вирівнювальними властивостями.

Наукова новизна. Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є вибір найбільш оптимального технічного рішення фундаменту, який має вирівнювальні властивості на основах, що нерівномірно деформуються.

Практична значимість. Розроблення або вдосконалення нового конструктивного рішення фундаментів із вирівнювальними властивостями і подальше його застосування у промисловому та цивільному будівництві в умовах нерівномірних осідань, що викликані деформаціями основи у складних інженерно-геологічних умовах і зазвичай значно перевищують відповідні величини, що мають місце у звичайних інженерно-геологічних умовах.

Результати. Проведені аналітичні дослідження дозволили виявити слабкі сторони існуючих технічних рішень фундаментів із вирівнювальними властивостями, що дозволить в подальшому розробити нові або вдосконалити існуючі конструктивні рішення.

Ключові слова: фундаменти з вирівнювальними властивостями, аналітичні методи, конструктивні рішення.