Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

“Допустити до захисту”
Завідувач кафедри БДМБ, д-р техн. наук, доцент
_____Володимир ЯЦУН
"____" _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

" Підвищення експлуатаційної надійності та тріщиностійкості гіпсокартонних конструкцій "

Виконав: здобувач групи БІ-25М
спеціальності G19
“Будівництво та цивільна інженерія”

_____ Ігор СКВОРЦОВ
"___" _____2026 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи:
д-р техн. наук, доцент

_____Володимир ЯЦУН
"___"_____2026 р.

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
СКВОРЦОВ ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ
Сертифікат: 21E4B79083A82E7F040000005EDA21014BC33008
Дійсний з 26.11.2026 14:37:26 по 27.11.2027 01:59:59

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра, циклова комісія Будівельних, дорожніх машин і будівництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрям підготовки G19 "Будівництво та цивільна інженерія"

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри, голова циклової комісії
д.т.н., доц. Яцун В.В.

_____

“____” _____2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Скворцову Ігору Володимировичу

(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи
Підвищення експлуатаційної надійності та тріщиностійкості гіпсокартонних конструкцій

керівник проекту (роботи) доцент Яцун В.В.

(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 10 ” серпня 2026 р. № 24-13

2. Строк подання студентом роботи “ 1 ” грудня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи

Об’єкт дослідження – тонкостінні великорозмірні пологі гіпсокартонні оболонки.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан, деформативність і тріщиностійкість гіпсокартонних оболонок залежно від ортотропії матеріалу, конструктивних особливостей та способів армування їхніх стиків і з’єднань.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Науково-дослідницький розділ. 2. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень)

Мультимедійна презентація, 20 слайдів (А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Науково-дослідницький	*доцент Яцун В.В.*		
Охорона праці	*доцент Дарієнко В.В.*		

7. Дата видачі завдання 1.09.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Дослідження стану питання*	*10.09.-15.09.2026*	
2	*Створення методики проведення випробувань*	*15.09.-20.09.2026*	
3	*Проведення натурного експерименту*	*20.09.-25.09.2026*	
4	*Аналіз отриманих даних*	*25.09.-15.10.2026*	
5	*Розробка заходів з охорони праці*	*15.10.-18.10.2026*	
6	*Оформлення альбому документів*	*18.10.-20.11.2026*	

Студент _____ Скворцов І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ Яцун В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Скворцов І.В. Підвищення експлуатаційної надійності та тріщиностійкості гіпсокартонних конструкцій. – Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю G19 "Будівництво та цивільна інженерія". – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

У роботі розглянуто питання підвищення експлуатаційної надійності та тріщиностійкості гіпсокартонних конструкцій, які широко застосовуються в сучасному будівництві для влаштування перегородок, облицювань, підвісних стель і криволінійних архітектурних елементів. Проаналізовано основні чинники, що впливають на міцність, деформативність і довговічність гіпсокартонних конструкцій, зокрема особливості роботи гіпсокартонних плит, металевого каркаса, стикових з'єднань та кріпильних елементів. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до оцінювання напружено-деформованого стану гіпсокартонних конструкцій з урахуванням особливостей їх конструктивної схеми та умов експлуатації. Результати дослідження спрямовані на розроблення конструктивно-технологічних рекомендацій щодо зменшення ризику утворення тріщин, підвищення довговічності та забезпечення стабільної експлуатації гіпсокартонних конструкцій.

Ключові слова: ГІПСОКАРТОН, СУХА ШТУКАТУРКА, ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ, ПЕРЕКРИТТЯ, БЕТОН

Annotation

Skvortsov I.V. Improving the operational reliability and crack resistance of gypsum board structures. – Qualification thesis for obtaining the Master's degree in the specialty G19 “Construction and Civil Engineering”. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The thesis addresses the issues of improving the operational reliability and crack resistance of gypsum board structures, which are widely used in modern construction for the installation of partitions, cladding, suspended ceilings, and curved architectural elements. The main factors affecting the strength, deformability, and durability of gypsum board structures are analyzed, including the performance characteristics of gypsum boards, metal framing, joint connections, and fastening elements. The necessity of a comprehensive approach to assessing the stress-strain state of gypsum board structures, taking into account their structural configuration and operating conditions, is substantiated. The research results are aimed at developing structural and technological recommendations for reducing the risk of crack formation, improving durability, and ensuring the stable performance of gypsum board structures.

Keywords: GYPSUM BOARD, DRY PLASTER, CRACK RESISTANCE, FLOOR SLABS, CONCRETE

Формат	Зона	Позначення	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4			ГК 26. ПЗ	Пояснювальна записка		
				Науково-дослідна частина		
А4				Науково-дослідна частина	20	

Зм	Лист	№ документа	Підпис	Дата	ГК 26. МР		
Розробив		Скворцов			Підвищення експлуатаційної надійності та тріщиностійкості гіпсокартонних конструкцій Відомість проекту	Літера	Лист	Листів
Перевірив.		Яцун				М	1	1
						ЦНТУ Гр. БІ-25М		
Н. контр.		Дарієнко						
Затвердив.		Яцун						

Вступ
Розділ 1. Актуальність досліджень
1.1 Гіпсокартонні плити та їх фізико-механічні властивості 3
1.2 Уніфіковані елементи металевого каркаса 4
1.3 Способи виготовлення криволінійних гіпсокартонних елементів 5
1.4 Аналіз конструктивних рішень та досвіду влаштування великорозмірних гіпсокартонних куполів-оболонок у цивільних будівлях 7
1.5 Аналіз методів розрахунку будівельних конструкцій 9
1.6 Чисельний аналіз напружено-деформованого стану конструкцій на основі методу скінченних елементів 10
1.7 Визначення напружено-деформованого стану будівельних тонкостінних оболонок 12
1.8 Вимірювання лінійних деформацій тензометрами та тензорезисторами 14
1.9 Моделювання напружено-деформованого стану композитних матеріалів 15
Висновки до розділу 1 18
Розділ 2. Експериментальна частина
2.1 Визначення руйнівного навантаження та прогину гіпсокартонних плит за змінного прольоту 21
2.2 Визначення межі міцності за розтягу під час згину гіпсокартонних плит 23
2.3 Методика випробування модельних зразків на осьовий розтяг 26
2.4 Методика випробування модельних зразків на чистий зсув 27
2.5 Випробування на міцність, тріщиностійкість і деформативність стиків одно- та двошарових гіпсокартонних зразків під час згину 28
Висновки до розділу 2 32
Розділ 3. Комп'ютерне моделювання
3.1 Архітектурно-планувальне рішення та основні конструктивні елементи несучого каркасу 34
3.2 Розрахунок несучого каркаса 41
Висновки до розділу 3 44
Розділ 4. Охорона праці
4.1 Загальні положення з охорони праці під час проведення досліджень 46
4.2. Вимоги безпеки під час виготовлення та оброблення гіпсокартонних зразків 47
4.3. Безпека під час проведення лабораторних випробувань 48
4.4. Електробезпека під час використання лабораторного обладнання 49
4.5. Заходи щодо зниження виробничих ризиків 50
Висновки 51

					ГК 26. ПЗ			
Зм	Лист	№ документа	*Підпис*	Дата				
Розробив		Скворцов			Підвищення експлуатаційної надійності та тріщиностійкості гіпсокартонних конструкцій	Літ.	Лист	Листів
Перевірив		Яцун				М	1	
						ЦНТУ Гр. БІ-26М		
Н. контр.		Дарієнко						
Затвердив.		Яцун						

Вступ

Комплектні гіпсокартонні (ГК) системи широко застосовуються у будівництві та реконструкції цивільних об’єктів завдяки малій матеріалоємності, високій відносній міцності на згин, варіативності звуко- й вогнезахисних характеристик, а також можливості формування криволінійних поверхонь. Надійність та цілісність таких конструкцій залежать від міцності самих плит і тріщиностійкості їхніх стиків, які в експлуатації є найвразливішими зонами.

Головними причинами появи дефектів є технологічні порушення під час монтажу, відсутність деформаційних швів, локальні концентрації напружень та невраховані динамічні впливи. Наразі точне розрахункове моделювання напружено-деформованого стану конструкцій довільної геометрії стримується браком надійних дослідних даних щодо фізико-механічних властивостей матеріалу.

Розділ 1. Актуальність досліджень

1.1 Гіпсокартонні плити та їх фізико-механічні властивості

Гіпсокартонна плита (ГКП) являє собою листовий оздоблювальний матеріал, який виготовляють за безперервною конвеєрною технологією. Конструктивно вона складається з гіпсового осердя, армованого мінеральними компонентами, та зовнішнього картонного облицювання. Поєднання гіпсового осердя та картонної оболонки забезпечує необхідну міцність, жорсткість, технологічність і стабільність геометричних параметрів виробу [1–3].

Гіпсокартон належить до великоформатних тонкостінних конструкційно-оздоблювальних плит. Незважаючи на відносно невелику товщину, матеріал характеризується достатньою міцністю при згині, що зумовлює його широке використання в сучасному будівництві [1, 2, 4].

Фізико-механічні характеристики гіпсокартонних плит визначаються властивостями гіпсового осердя, картонного облицювання, їхньою взаємодією та технологією виготовлення. Основними показниками, що характеризують експлуатаційні властивості ГКП, є міцність при стиску, розтягу, згині та зсуві, твердість, модуль пружності, теплопровідність, теплоємність, паропроникність і здатність до зміни геометричних параметрів під впливом вологості та температури [1, 3–5].

В експлуатаційних умовах гіпсокартонні плити можуть працювати на згин, розтяг, стиск і зсув. При цьому на матеріал впливають температурні коливання, зміна вологості, тривалість навантаження та інші фактори навколишнього середовища [3–5].

Деформативність гіпсового матеріалу залежить від тривалості дії навантаження, пористості, вологості та температурного режиму. Під час навантаження в матеріалі можуть виникати як пружні, так і залишкові деформації. Зі збільшенням тривалості навантаження та вологості характер деформування може змінюватися, що необхідно враховувати під час оцінювання експлуатаційної надійності конструкцій [4–6].

Важливою особливістю ГКП є анізотропія властивостей, яка зумовлена насамперед орієнтацією картонного облицювання. Міцність і деформативність

плити в поздовжньому та поперечному напрямках можуть істотно відрізнятися. Тому під час розрахунку конструкцій необхідно враховувати напрямок прикладання навантаження відносно основної осі плити [3–6].

До основних теплофізичних характеристик гіпсокартонних плит належать паропроникність, теплопровідність, питома теплоємність і коефіцієнт температурного розширення. Зміна вологості навколишнього середовища може спричиняти набухання матеріалу за товщиною та зміну його геометричних характеристик [3, 4, 7].

Гіпсокартонні плити мають низку важливих експлуатаційних переваг: відносно невисоку матеріаломісткість, простоту механічної обробки, можливість монтажу без застосування складного спеціалізованого обладнання, невелику масу, зручність транспортування, високу точність геометричних розмірів і можливість створення складних архітектурних форм [1, 2, 8].

До інших важливих властивостей належать достатня жорсткість, вогнестійкість, теплоізоляційні та звукоізоляційні характеристики, технологічність, екологічність і можливість використання механічних кріплень без попереднього свердління отворів у багатьох випадках монтажу [1, 2, 8, 9].

Таким чином, поєднання конструкційних і оздоблювальних властивостей робить гіпсокартон придатним не тільки для плоских облицювань і перегородок, а й для створення просторових криволінійних конструкцій [8–10].

1.2 Уніфіковані елементи металевого каркаса

Для забезпечення необхідної експлуатаційної жорсткості конструкцій із гіпсокартонних плит використовують металеві каркаси, сформовані з уніфікованих профілів і елементів кріплення [8–10].

Основними матеріалами для виготовлення металевих профілів є тонколистова оцинкована сталь або сталеві стрічки з відповідним захисним покриттям. Застосування оцинкованої сталі забезпечує підвищену корозійну стійкість елементів каркаса та достатню довговічність конструкцій [9–11].

За формою поперечного перерізу профілі можуть бути умовно поділені на напрямні та несучі. Найбільш поширеними є профілі з U-подібним і C-подібним поперечним перерізом. Для підвищення жорсткості стінок профілів під час їх холодного формування виконують поздовжні ребра жорсткості [9–11].

Металевий каркас забезпечує передачу навантажень від гіпсокартонної обшивки до несучих елементів будівлі. Його конструктивна схема залежить від призначення системи, геометрії поверхні, величини навантажень і вимог до жорсткості [8–10].

У конструкціях підвісних стель та криволінійних поверхонь широко використовуються несучі профілі, які можуть встановлюватися в різних просторових положеннях. Для створення поверхонь складної форми профілі можуть попередньо згинатися відповідно до заданого радіуса [8–10].

З'єднання елементів металевого каркаса здійснюється за допомогою спеціальних з'єднувачів, підвісів, кріпильних деталей і самонарізних гвинтів. Вибір типу з'єднання залежить від конструктивної схеми та характеру навантаження [8–11].

Для просторових і криволінійних конструкцій особливо важливими є точність геометричного положення елементів каркаса, надійність вузлів з'єднання та забезпечення необхідної просторової жорсткості [8–11].

1.3 Способи виготовлення криволінійних гіпсокартонних елементів

Криволінійні поверхні з гіпсокартонних плит широко застосовуються в громадських, житлових та інших будівлях. Вони можуть використовуватися у вокзалах, терміналах, торговельних і виставкових павільйонах, глядацьких залах, навчальних аудиторіях, холах готелів, санаторно-курортних і медичних закладах [8–10].

Створення криволінійних елементів із ГКП залежить від товщини плити, необхідного радіуса кривизни, характеру поверхні та технологічних можливостей. Основними способами формування є механічне фрезерування, згинання у зволоженому стані та згинання у сухому стані [8, 12, 13].

Зволоження гіпсокартонної плити дає змогу підвищити її пластичність і зменшити необхідний радіус згинання. Під час формування криволінійних елементів плиту встановлюють на спеціально підготовлений шаблон, який визначає необхідну геометрію майбутньої конструкції [8, 12, 13].

Шаблон повинен мати достатню міцність, жорсткість і стабільність геометричних розмірів. Його конструкція має забезпечувати можливість надійного закріплення плити та збереження заданої форми протягом усього технологічного процесу [8, 12].

Перед зволоженням плиту встановлюють на опори таким чином, щоб уникнути небажаного зволоження її кромок і тильної поверхні. Зволоження здійснюють поступово до досягнення необхідної пластичності гіпсового осердя [8, 12, 13].

Для прискорення проникнення вологи можуть застосовуватися технологічні прийоми, спрямовані на створення додаткових каналів проникнення води в гіпсове осердя. Після досягнення необхідної пластичності плиту поступово згинають і фіксують на шаблоні [12, 13].

Після завершення формування конструкція повинна залишатися на шаблоні до повного висихання матеріалу. Після висихання гіпсокартон зберігає задану криволінійну форму та може використовуватися як елемент просторової конструкції [8, 12, 13].

Іншим способом формування поверхонь малого радіуса є використання заготовок із фрезерованими пазами. Пази можуть мати різну форму та розташування залежно від необхідної геометрії поверхні [12, 13].

Під час виготовлення криволінійного елемента пази розміщують із боку, який під час згинання зазнає розтягу, при цьому протилежний шар картонного облицювання залишається непошкодженим. Відстань між пазами визначається необхідною плавністю та радіусом кривизни [12, 13].

Після формування заготовку встановлюють на шаблон, очищують пази від залишків матеріалу та заповнюють їх відповідною шпаклювальною сумішшю. Після висихання шпаклівки поверхню додатково обробляють для отримання необхідної геометрії та якості оздоблення [12, 13].

Технологія фрезерування дає змогу отримувати не тільки плавні криволінійні поверхні, а й складні ламані, коробчасті, ступінчасті, гофровані та багаторівневі форми [12, 13].

Застосування криволінійних гіпсокартонних елементів розширює архітектурні можливості формування внутрішнього простору будівель. Такі конструкції можуть використовуватися для декоративного оформлення приміщень, прихованого прокладання інженерних комунікацій, облицювання колон, пілонів, пілястр та інших архітектурних елементів [8–10].

Крім декоративної функції, просторові гіпсокартонні конструкції можуть сприяти підвищенню вогнестійкості та покращенню акустичних характеристик приміщень [1, 2, 8, 9].

1.4 Аналіз конструктивних рішень та досвіду влаштування великорозмірних гіпсокартонних куполів-оболонок у цивільних будівлях

Купол є просторовою несучою конструкцією покриття, геометрична форма якої наближена до сферичної, еліптичної або іншої поверхні обертання. Купольні конструкції мають тривалу історію розвитку та широко використовувалися в архітектурі різних історичних періодів [14–16].

Перші купольні конструкції виготовляли переважно з природних і традиційних будівельних матеріалів. З розвитком будівельних технологій у купольних покриттях почали застосовувати металеві каркаси, залізобетон, скло та інші сучасні матеріали [14–16].

Сучасні купольні покриття характеризуються значним різноманіттям конструктивних і геометричних рішень. За конструктивною схемою розрізняють ребристі, ребристо-кільцеві, сітчасті та інші типи куполів. За геометричною формою вони можуть бути сферичними, еліптичними, стрілчастими та іншими [14–17].

Особливе місце посідають ребристо-кільцеві куполи, в яких основні елементи працюють спільно як просторова система. Кільцеві елементи сприймають зусилля, що виникають унаслідок роботи ребер, а в окремих випадках також беруть участь у сприйнятті згинальних моментів [14–17].

У конструкціях великорозмірних гіпсокартонних куполів може застосовуватися комбінована система, яка складається з основного металевого каркаса та вторинного каркаса з тонкостінних профілів. Основний каркас забезпечує загальну просторову жорсткість конструкції, тоді як вторинний каркас призначений для кріплення гіпсокартонної обшивки [8–10, 14–17].

Для формування криволінійних поверхонь використовуються попередньо зігнуті профілі. Їхня геометрія визначається заданою формою купола та вимогами до точності поверхні [8–10].

З'єднання елементів каркаса виконується за допомогою спеціальних з'єднувальних деталей і механічних кріплень. Кріплення основного каркаса до конструкцій будівлі здійснюється за допомогою регульованих підвісів та анкерних кріплень [8–10, 17].

Гіпсокартонна обшивка встановлюється після формування та остаточного закріплення металевого каркаса в проектному положенні. Монтаж обшивки виконується послідовно, з урахуванням геометрії поверхні та особливостей роботи окремих ділянок конструкції [8–10].

Досвід улаштування великорозмірних криволінійних гіпсокартонних поверхонь у цивільних будівлях свідчить про необхідність додаткового розрахункового обґрунтування таких конструкцій. Це пов'язано зі складною просторовою роботою каркаса, впливом власної ваги, монтажних і експлуатаційних навантажень, а також необхідністю забезпечення тріщиностійкості та мінімальних деформацій [14–18].

Особливо відповідальними ділянками гіпсокартонних конструкцій є стики окремих плит. Саме в цих місцях можуть виникати концентрації напружень і локальні деформації, які за несприятливих умов призводять до утворення та розвитку тріщин [4–6, 18].

До основних причин утворення тріщин у гіпсокартонних конструкціях належать відсутність або недостатня кількість деформаційних швів, температурні деформації, переміщення несучих конструкцій будівлі, невраховані динамічні впливи, локальна концентрація навантажень, наявність складних вирізів, а також порушення технології монтажу [8–10, 18].

Значний вплив на тріщиностійкість має якість виконання стиків, правильність розташування кріпильних елементів, відповідність конструктивної схеми проектним рішенням та дотримання технології підготовки поверхонь [8–10, 18].

Таким чином, для великорозмірних гіпсокартонних куполів-оболонок питання забезпечення просторової жорсткості, стабільності геометричної форми та тріщиностійкості повинні розглядатися комплексно ще на етапі проектування [14–18].

1.5 Аналіз методів розрахунку будівельних конструкцій

Методи інженерного аналізу будівельних конструкцій можна умовно поділити на класичні та чисельні [19–22].

Класичні методи ґрунтуються на безпосередньому застосуванні основних положень механіки, теорії пружності, будівельної механіки та інших фундаментальних дисциплін. Їхньою перевагою є відносна простота фізичної інтерпретації отриманих результатів [19–21].

Енергетичні методи ґрунтуються на використанні енергетичних принципів механіки та дають змогу визначати параметри напружено-деформованого стану конструкції на основі умов енергетичної рівноваги [19–21].

Метод граничних елементів передбачає представлення розрахункової області через її межу, що дає можливість зменшити розмірність задачі. Його застосування потребує відповідного математичного апарату та знання фундаментальних розв'язків [21, 22].

Метод скінченних різниць передбачає заміну диференціальних рівнянь відповідною системою алгебраїчних рівнянь. Метод може застосовуватися для розв'язання задач зі складною геометрією, однак у багатьох випадках потребує значних обчислювальних ресурсів [19, 21, 22].

Метод скінченних елементів дає змогу використовувати елементи різної форми та виконувати дискретизацію областей складної геометрії. Розрахункові

моделі можуть містити стрижневі, пластинчасті, оболонкові та об'ємні елементи [19–22].

Однією з основних переваг методу скінченних елементів є можливість задавати складну геометрію, різноманітні властивості матеріалів, довільні навантаження та граничні умови [19–22].

Точність розрахунку залежить від правильності побудови геометричної моделі, вибору типу скінченних елементів, якості дискретизації, коректності граничних умов та достовірності вихідних фізико-механічних характеристик матеріалів [19–22].

У методі скінченних елементів як основні невідомі можуть використовуватися переміщення, деформації, внутрішні сили, напруження або їх комбінації. Залежно від вибору основних невідомих розрізняють різні форми реалізації методу [19–21].

Найбільш поширеним є варіант методу скінченних елементів, у якому основними невідомими є вузлові переміщення. За отриманими переміщеннями визначають деформації та напруження в елементах конструкції [19–21].

Формування системи розрахункових рівнянь ґрунтується на енергетичних принципах механіки. Застосування такого підходу забезпечує достатню стійкість чисельного розв'язання та дає змогу реалізувати складні розрахункові моделі [19–21].

Метод скінченних елементів має значні переваги під час дослідження складних просторових конструкцій, проте потребує ретельного вибору параметрів дискретизації та контролю якості розрахункової моделі [19–22].

1.6 Чисельний аналіз напружено-деформованого стану конструкцій на основі методу скінченних елементів

Метод скінченних елементів ґрунтується на представленні реальної суцільної конструкції її дискретною розрахунковою моделлю. Такий підхід дає змогу досліджувати напружено-деформований стан конструкцій складної геометрії та визначати реакцію системи на різні види навантаження [19–22].

Побудова розрахункової моделі передбачає декілька взаємопов'язаних етапів. Спочатку формується геометрична модель конструкції з визначенням її основних елементів, вузлів та геометричних параметрів [19–22].

На наступному етапі визначається тип скінченних елементів, який найбільш доцільно використовувати для моделювання окремих частин конструкції. Залежно від характеру задачі можуть застосовуватися стрижневі, пластинчасті, оболонкові або об'ємні елементи [19–22].

Важливим етапом є дискретизація конструкції. Розрахункова область поділяється на скінченну кількість елементів, об'єднаних у вузлах. У місцях передбачуваної концентрації напружень або значних градієнтів деформацій необхідно застосовувати більш дрібну сітку [19–22].

У відносно однорідних ділянках конструкції допускається використання крупнішої сітки, що дає змогу зменшити обсяг обчислень без істотної втрати точності [19–22].

Кожен скінченний елемент характеризується геометричними параметрами, координатами вузлів, типом з'єднання з іншими елементами та фізико-механічними характеристиками матеріалу [19–21].

Окреме значення має правильне задання граничних умов. Вони повинні відображати реальний характер взаємодії конструкції з опорами, сусідніми елементами та іншими частинами будівлі [19–22].

До розрахункової моделі можуть вводитися нерухомі, рухомі, пружні та інші типи зв'язків. Вибір граничних умов має забезпечувати кінематичну незмінність системи та відповідність реальній роботі конструкції [19–22].

Навантаження задаються відповідно до фактичних умов експлуатації. Вони можуть бути зосередженими, розподіленими, поверхневими, об'ємними або температурними [19–22].

Під час формування розрахункової моделі важливо забезпечити відповідність способу прикладання навантаження реальній роботі конструкції. За необхідності складні розподілені навантаження можуть бути приведені до еквівалентної системи вузлових впливів [19–21].

Результатом чисельного аналізу є визначення переміщень, деформацій, напружень, внутрішніх зусиль та інших параметрів напружено-деформованого стану конструкції [19–22].

Якість розрахунку значною мірою залежить від параметрів скінченно-елементної сітки. Надмірно крупна сітка може призвести до втрати точності, тоді як надмірне подрібнення збільшує обсяг обчислень [19–22].

Особливу увагу необхідно приділяти зонам концентрації напружень, геометричних переходів, отворів, стиків та місць прикладання локальних навантажень [19–22].

Плавна зміна розмірів скінченних елементів сприяє підвищенню стабільності чисельного розв'язання. Значна різниця між розмірами сусідніх елементів може негативно впливати на точність отриманих результатів [19–22].

Форма елементів також має значення. Надмірно витягнуті або деформовані елементи можуть знижувати точність розрахунку. Тому під час формування сітки необхідно забезпечувати прийнятну геометричну якість елементів [19–22].

Метод скінченних елементів забезпечує наочну геометричну, конструктивну та фізичну інтерпретацію результатів і є одним з основних методів сучасного чисельного аналізу будівельних конструкцій [19–22].

1.7 Визначення напружено-деформованого стану будівельних тонкостінних оболонок

Значна частина оболонок, що застосовуються в будівництві, належить до тонкостінних конструкцій. Для їхнього розрахунку використовуються положення теорії оболонок, у межах якої приймається низка спрощувальних припущень [23–25].

Одним із основних є припущення про пружну роботу матеріалу на відповідній стадії навантаження та малі переміщення порівняно з геометричними розмірами конструкції [23–25].

Використовуються також положення теорії пластин, відповідно до яких елементи, нормальні до середньої поверхні оболонки, після деформування

зберігають прямолінійність і залишаються близькими до нормального положення [23–25].

Іншим важливим припущенням є нехтування нормальними напруженнями, перпендикулярними до середньої поверхні, якщо їхній вплив на загальну роботу конструкції є незначним [23–25].

Для опису оболонок складної геометрії застосовують криволінійні координати, пов'язані із середньою поверхнею конструкції. Такий підхід дає змогу описувати положення будь-якої точки оболонки та визначати параметри її деформованого стану [23–25].

У загальному випадку в оболонці можуть виникати мембранні сили, згинальні та крутильні моменти, поперкові й зсувні сили. Їхнє співвідношення залежить від геометрії оболонки, характеру навантаження, умов закріплення та властивостей матеріалу [23–25].

Для окремих випадків застосовується безмоментна теорія оболонок. Вона дає змогу істотно спростити розрахункову модель, якщо геометрія поверхні змінюється плавно, товщина оболонки є сталою або змінюється незначно, а навантаження розподілені без різких локальних змін [23–25].

У межах безмоментної теорії основна частина навантаження сприймається за рахунок мембранної роботи середньої поверхні оболонки. Згинальні та поперечні ефекти вважаються другорядними [23–25].

Для оболонок обертання із симетричною геометрією та симетричним навантаженням робота конструкції може описуватися переважно меридіональними та кільцевими зусиллями [23–25].

За рівномірного розподілу навантаження та сталих геометричних параметрів напружений стан окремих ділянок оболонки може бути близьким до однорідного. Водночас у реальних конструкціях локальні особливості геометрії, стики, отвори, місця кріплення та нерівномірність навантаження можуть спричиняти виникнення додаткових згинальних і локальних напружень [23–25].

1.8 Вимірювання лінійних деформацій тензометрами та тензорезисторами

Експериментальне визначення деформацій є важливою складовою дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій [26, 27].

За конструктивним принципом тензометри можуть бути механічними, електромеханічними, струнними, дротяними, електричними та іншими. Вибір вимірювального приладу залежить від величини очікуваної деформації, швидкості її зміни, умов проведення експерименту та необхідної точності [26, 27].

Механічні тензометри дають змогу визначати невеликі переміщення за допомогою системи важелів та механічних передавальних елементів. Їхніми перевагами є конструктивна простота, надійність та можливість безпосереднього відліку результатів [26, 27].

Під час експериментальних досліджень тензометр встановлюють безпосередньо на досліджувану конструкцію або зразок. Надійність його закріплення має важливе значення для достовірності результатів вимірювань [26, 27].

Механічні тензометри доцільно застосовувати для відносно повільних процесів деформування. Під час вимірювання швидкозмінних деформацій або в умовах значної вібрації необхідно використовувати інші вимірювальні системи [26, 27].

Електричні тензометри можуть працювати на основі зміни електричного опору, ємності, індуктивності та інших фізичних параметрів. Серед них значне поширення отримали електротензометричні системи з тензорезисторами [26, 27].

Тензорезистори характеризуються високою чутливістю та дають змогу вимірювати малі деформації на локальних ділянках конструкції. Вони можуть застосовуватися також у важкодоступних місцях [26, 27].

За конструктивним виконанням розрізняють дротяні, фольгові та напівпровідникові тензорезистори [26, 27].

Дротяні тензорезистори виготовляються з тонкого металевого дроту, сформованого у вигляді чутливого елемента. Вони забезпечують достатню точність вимірювань і можуть застосовуватися для визначення відносно невеликих деформацій [26, 27].

Фольгові тензорезистори виготовляються з тонкої металевої фольги. Їх конструкція забезпечує компактність, достатню механічну міцність та ефективне відведення тепла [26, 27].

Напівпровідникові тензорезистори характеризуються високою чутливістю до деформацій, що дає змогу вимірювати дуже малі зміни деформованого стану. Водночас їхні характеристики значною мірою залежать від температури та властивостей напівпровідникового матеріалу [26, 27].

Під час проведення експериментальних досліджень важливо враховувати температурний вплив, правильність встановлення датчиків, якість контакту з поверхнею конструкції та стабільність вимірювальної системи [26, 27].

Таким чином, поєднання механічних і електричних методів вимірювання деформацій дає змогу отримувати достовірні експериментальні дані, необхідні для перевірки розрахункових моделей [26, 27].

1.9 Моделювання напружено-деформованого стану композитних матеріалів

Композитні матеріали характеризуються складною внутрішньою структурою та значним різноманіттям конструктивних схем армування. У будівництві застосовуються шаруваті матеріали, композити з дискретним армуванням, матеріали з безперервними волокнами та просторово армовані композиції [28–30].

Основними складовими композиту є матриця та армувальні компоненти. Матриця формує загальну геометрію матеріалу, забезпечує передавання навантажень між армувальними елементами та бере участь у сприйнятті зовнішніх впливів [28–30].

Армувальні компоненти забезпечують необхідні міцнісні та деформативні характеристики композиту. Залежно від орієнтації та типу армування матеріал може характеризуватися анізотропними або ортотропними властивостями [28–30].

У механіці композитів доцільно розглядати два рівні неоднорідності. На мікрорівні досліджується структура матеріалу, взаємодія матриці та армувальних компонентів, а також розподіл напружень і деформацій на межах їх контакту [28–30].

На макрорівні композит може розглядатися як умовно однорідне анізотропне тіло з ефективними механічними характеристиками. Такий підхід дає змогу використовувати положення теорії анізотропних середовищ для розрахунку конструктивних елементів [28–30].

Мікромеханічний підхід дає можливість досліджувати зв'язок між властивостями композиту та характеристиками його складових. Він також дає змогу оцінювати локальні концентрації напружень і деформацій [28–30].

Макромеханічний підхід використовується для визначення узагальнених жорсткісних і деформативних характеристик композиту. При цьому неоднорідний матеріал замінюється еквівалентним однорідним анізотропним середовищем [28–30].

Такий підхід є особливо ефективним під час розрахунку жорсткості пластин, оболонок та інших конструктивних елементів. Водночас він має обмеження щодо визначення локальних концентрацій напружень на межах між різними компонентами матеріалу та в зонах структурних дефектів [28–30].

Механічні властивості композитів характеризуються значною кількістю незалежних параметрів. Для їх опису використовуються модулі пружності, модулі зсуву, коефіцієнти поперечної деформації та інші характеристики [28–30].

Моделі деформування та руйнування композитних матеріалів будуються з урахуванням їхньої структурної неоднорідності та особливостей взаємодії складових компонентів [28–30].

Під час розрахунку анізотропних матеріалів необхідно враховувати напрямок армування. Для ортотропних матеріалів основні осі симетрії властивостей зазвичай пов'язують із напрямками укладання армувальних елементів [28–30].

Для оцінювання міцності композитних матеріалів у складному напруженому стані застосовують відповідні критерії граничних станів. Вони дають змогу визначити момент переходу матеріалу від пружного стану до нелінійного деформування або руйнування [28–30].

Розрахунок ефективних пружних характеристик ортогонально армованих композитів може здійснюватися на основі моделі, що складається з односпрямованих шарів, орієнтованих у взаємно перпендикулярних напрямках [28–30].

Основним припущенням такого підходу є те, що кожен окремий шар під час навантаження перебуває в умовно однорідному напружено-деформованому стані, а між шарами існує достатньо жорсткий зв'язок [28–30].

У результаті композит розглядається як ортотропний матеріал із заданими ефективними пружними та деформативними характеристиками [28–30].

Для інженерних розрахунків характеристики композитного матеріалу можуть визначатися шляхом усереднення властивостей окремих компонентів з урахуванням їхньої об'ємної частки, взаємного розташування та характеру взаємодії [28–30].

Такий підхід дає можливість спростити розрахункову модель і використовувати її під час чисельного аналізу складних будівельних конструкцій [28–30].

Отже **мета роботи** - розвиток методики оцінки напружено-деформованого стану (НДС) тонкостінних великорозмірних пологих гіпсокартонних (ГК) оболочок за різних умов експлуатації та розробка рекомендацій щодо підвищення їхньої тріщиностійкості на основі дослідження ортотропії пружних характеристик гіпсокартонних плит (ГКП) і

закономірностей деформування складених зразків-моделей із різними варіантами армування.

Завдання дослідження

- **Виконати** порівняльний аналіз нормативних методів визначення регламентованих фізико-механічних характеристик ГКП.
- **Виконати** експериментальні дослідження міцності, тріщиностійкості та деформативності одно- й двошарових ГК-зразків-моделей за стандартного та додаткового армування стиків і міжелементних (міжз'єднувальних) з'єднань.
- **Виконати** чисельний аналіз тонкостінних великорозмірних пологих ГК-оболочок за різних умов експлуатації.

Висновки до розділу 1

1. Гіпсокартонні плити належать до великоформатних тонкостінних конструкційно-оздоблювальних матеріалів, які характеризуються невеликою масою, достатньою міцністю при згині, технологічністю та можливістю створення складних архітектурних форм. Поєднання гіпсового осердя та картонного облицювання забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики матеріалу.

2. Ефективність роботи гіпсокартонних конструкцій значною мірою визначається характеристиками металевого каркаса. Використання уніфікованих профілів, з'єднувальних елементів і регульованих підвісів дає змогу формувати конструкції різної геометрії та забезпечувати необхідну просторову жорсткість.

3. Для виготовлення криволінійних гіпсокартонних елементів застосовують технології згинання у зволоженому або сухому стані, а також механічного фрезерування. Вибір технології залежить від товщини плити, необхідного радіуса кривизни та геометрії майбутньої конструкції.

4. Сучасні технології дають змогу створювати великорозмірні гіпсокартонні куполи та оболонки складної геометричної форми. Такі конструкції можуть виконувати не лише декоративну, а й функціональну роль,

забезпечуючи формування внутрішнього простору, приховане розміщення інженерних комунікацій та покращення окремих експлуатаційних характеристик приміщень.

5. Застосування великорозмірних криволінійних гіпсокартонних конструкцій потребує додаткового розрахункового обґрунтування. Особливої уваги потребують питання забезпечення просторової жорсткості, стабільності геометричної форми, мінімізації прогинів та запобігання утворенню тріщин.

6. Найбільш уразливими ділянками гіпсокартонних конструкцій є стики плит, місця кріплення та зони концентрації локальних напружень. Причинами утворення тріщин можуть бути температурні та деформаційні впливи, переміщення несучих конструкцій, локальні навантаження та порушення технології монтажу.

7. Серед сучасних методів чисельного аналізу будівельних конструкцій особливе місце посідає метод скінченних елементів. Він дає змогу моделювати конструкції складної геометрії, задавати різні фізико-механічні властивості матеріалів, моделювати складні навантаження та визначати основні параметри напружено-деформованого стану.

8. Точність розрахунку методом скінченних елементів залежить від якості геометричної моделі, правильності вибору типу скінченних елементів, параметрів розрахункової сітки, коректності граничних умов і достовірності характеристик матеріалів. Особливу увагу необхідно приділяти зонам концентрації напружень та різкої зміни геометрії.

9. Для аналізу тонкостінних оболонок можуть використовуватися положення класичної теорії оболонок та безмоментна теорія. Вибір розрахункової моделі залежить від геометрії оболонки, характеру навантаження, умов закріплення та співвідношення основних геометричних параметрів конструкції.

10. Експериментальне визначення деформацій є важливим етапом дослідження роботи гіпсокартонних конструкцій. Для цього можуть застосовуватися механічні тензометри, електричні вимірювальні системи та

тензорезистори. Вибір засобу вимірювання визначається необхідною точністю, діапазоном деформацій та умовами проведення експерименту.

11. Композитні матеріали доцільно досліджувати на мікро- та макрорівнях. На мікрорівні враховується взаємодія окремих компонентів матеріалу, а на макрорівні композит може розглядатися як еквівалентне анізотропне або ортотропне середовище.

12. Для побудови моделі деформування гіпсокартонної плити доцільно використовувати структурно-феноменологічний підхід, який дає змогу врахувати складну будову матеріалу, взаємодію гіпсового осердя та картонного облицювання, а також анізотропію його механічних властивостей.

13. Однією з актуальних задач подальших досліджень є експериментальне визначення пружних і міцнісних характеристик гіпсокартонних плит, а також встановлення закономірностей їх деформування під дією різних видів навантаження. Отримані експериментальні дані можуть бути використані для формування достовірної чисельної моделі та подальшого дослідження напружено-деформованого стану великорозмірних гіпсокартонних куполів-оболонок.

Розділ 2. Експериментальна частина

2.1 Визначення руйнівного навантаження та прогину гіпсокартонних плит за змінного прольоту

Метод випробування полягає у створенні згинальних напружень у зразку за однопролітною схемою навантаження. Навантаження прикладають посередині прольоту, вимірюють прогин у цій самій точці, після чого продовжують навантаження до руйнування зразка (рис.1).

Для випробувань виготовляли зразки гіпсокартонних плит завширшки (400+5) мм і завдовжки (40s+100)+5 мм, де s — номінальна товщина листа, мм. Зразки вирізали на відстані не менше ніж 100 мм від країв плити. Кожен зразок маркували залежно від напрямку вирізання: поздовжній (L) або поперечний (T). Перед випробуванням зразки висушували.

На випробувальному обладнанні встановлювали проліт залежно від номінальної товщини досліджуваного зразка:

$$l=40s,$$

де l — відстань між опорами, мм; s — номінальна товщина гіпсокартонної плити, мм.

Для плит завтовшки 9,5 мм проліт становив 380 мм, а для плит завтовшки 12,5 мм — 500 мм.

За стандартною схемою поздовжні зразки випробовували лицьовою стороною донизу, а поперечні — тильною стороною донизу. Для детальнішого дослідження особливостей деформування гіпсокартонних плит додатково застосовували іншу схему: поздовжні зразки випробовували лицьовою стороною догори, а поперечні — лицьовою стороною донизу.

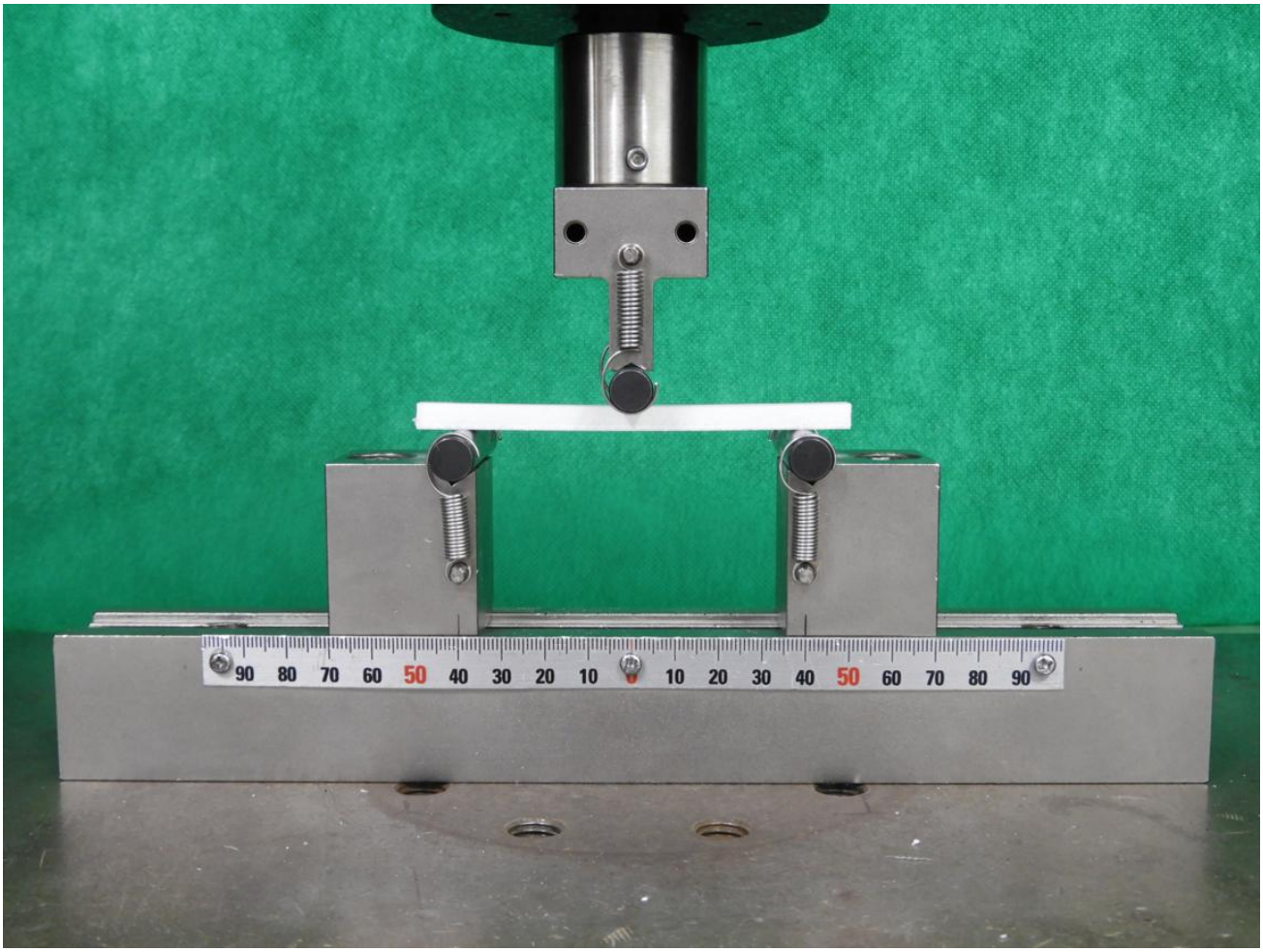


Рисунок 1 — Схема випробування гіпсокартонних зразків на згин за змінного прольоту

До зразка прикладали початкове навантаження 50 Н і витримували його протягом 1 хв. Після цього вимірювали прогин посередині прольоту. Далі навантаження збільшували зі швидкістю 15–20 Н/с до 100 Н, витримували зразок під цим навантаженням протягом 1 хв і повторно вимірювали прогин. Потім навантаження збільшували з тією самою швидкістю до руйнування зразка.

Прогин зразка визначали як різницю між значеннями прогину за навантажень 100 і 50 Н:

$f=f_{100}-f_{50}$,

де f — визначений прогин зразка, мм; f_{100} і f_{50} — прогини за навантажень 100 і 50 Н відповідно.

Руйнівне навантаження та прогин серії зразків визначали як середнє арифметичне значення результатів випробувань і заносили в таблицю 1.

Результати випробування кожного окремого зразка порівнювали з установленими нормативними вимогами.

Таблиця 1 — Нормовані вимоги до руйнівного навантаження та прогину гіпсокартонних плит за випробувань зі змінним прольотом

Товщина листа, мм	Руйнівне навантаження для поздовжніх зразків, Н, не менше	Руйнівне навантаження для поперечних зразків, Н, не менше	Прогин поздовжніх зразків, мм, не більше	Прогин поперечних зразків, мм, не більше
До 10,0 включно	470	165	—	—
Понад 10,0 до 18,0 включно	580	170	0,75 (0,95)	1,1 (1,35)
Понад 18,0	470	—	—	—

2.2 Визначення межі міцності за розтягу під час згину гіпсокартонних плит

Визначення межі міцності гіпсокартонних плит за розтягу під час згину виконували відповідно до методики DIN EN 520.

Із плит вирізали зразки прямокутної форми у двох напрямках: поздовжньому (L) та поперечному (T) (рис.2). Відстань від місць вирізання зразків до поздовжніх і поперечних країв плити становила не менше ніж 100 мм.

Зразки висушували за температури (40±2) °С до досягнення сталої маси. Випробування проводили за однопролітною схемою з відстанню між опорами 350±1 мм.

Поздовжні зразки встановлювали на опори лицьовою стороною донизу, а поперечні — лицьовою стороною догори.

Навантаження прикладали через ніж із радіусом заокруглення не менше ніж 5 мм. Швидкість навантаження становила (250±125) Н/хв. Точність позиціювання точки прикладання навантаження становила ±2 мм. Час від початку навантаження до руйнування зразка не перевищував 20 с.



Рисунок 2 — Однопролітна схема випробування гіпсокартонного зразка на згин.

Примітки: наведені значення граничного навантаження є середніми. Допустиме відхилення одиничного результату становить 10 %. Для проміжних значень товщини передбачено інтерполяцію. Під час випробування поздовжніх зразків лицьова поверхня картону перебуває в зоні розтягу, а поперечних — тильна поверхня. Модуль пружності наведено як середнє значення (табл.2).

Таблиця 2 — Нормовані значення граничного навантаження під час згину та модуля пружності гіпсокартонних плит

Номінальна товщина t мм	Граничне навантаження для поздовжніх зразків L, Н, не менше	Граничне навантаження для поперечних зразків Т, Н, не менше	Модуль пружності поздовжніх зразків E_L Н/мм², не менше	Модуль пружності поперечних зразків E_T Н/мм², не менше
Менше 12,5	43t	15t	—	—
12,5	580	200	2700	2100
15	750	240	2700	2100
18	870	320	2700	2100
Понад 18	43t	15t	—	—

Руйнівне навантаження та прогин під час згину визначали як середні арифметичні значення результатів випробувань і порівнювали з нормативними вимогами.

Для визначення модуля пружності E використовували лінійну ділянку графіка залежності сили від прогину, що відповідає діапазону від 10 до 40 % максимального руйнівного навантаження F_max. Модуль пружності кожного зразка обчислювали за формулою:

E=(l^3(F_2-F_1)) / (4bt^3(α_2-α_1)), (1) \

де l — відстань між центрами опор, що дорівнює 350 мм; b — ширина зразка, 300 мм; t — номінальна товщина гіпсокартонного листа, мм; F_2-F_1 — приріст навантаження на прямолінійній ділянці графіка, Н; α_2-α_1 — приріст прогину посередині зразка, що відповідає зміні навантаження від F_1 до F_2.

При цьому F_1 приймали приблизно рівним 10 %, а F_2 — приблизно 40 % від F_max.

2.3 Методика випробування модельних зразків на осьовий розтяг

Для визначення повного набору пружних характеристик гіпсокартонних плит завтовшки 12,5 мм проводили випробування на осьовий розтяг за допомогою спеціально розробленої експериментальної установки (рис.3).

Через відсутність стандартизованої методики підготовку зразків типів А і Б та їх навантаження здійснювали за аналогією з випробуваннями на згин. Для експериментальних досліджень було спроєктовано й виготовлено установку, яка давала змогу випробовувати одношарові та двошарові зразки на осьовий розтяг.

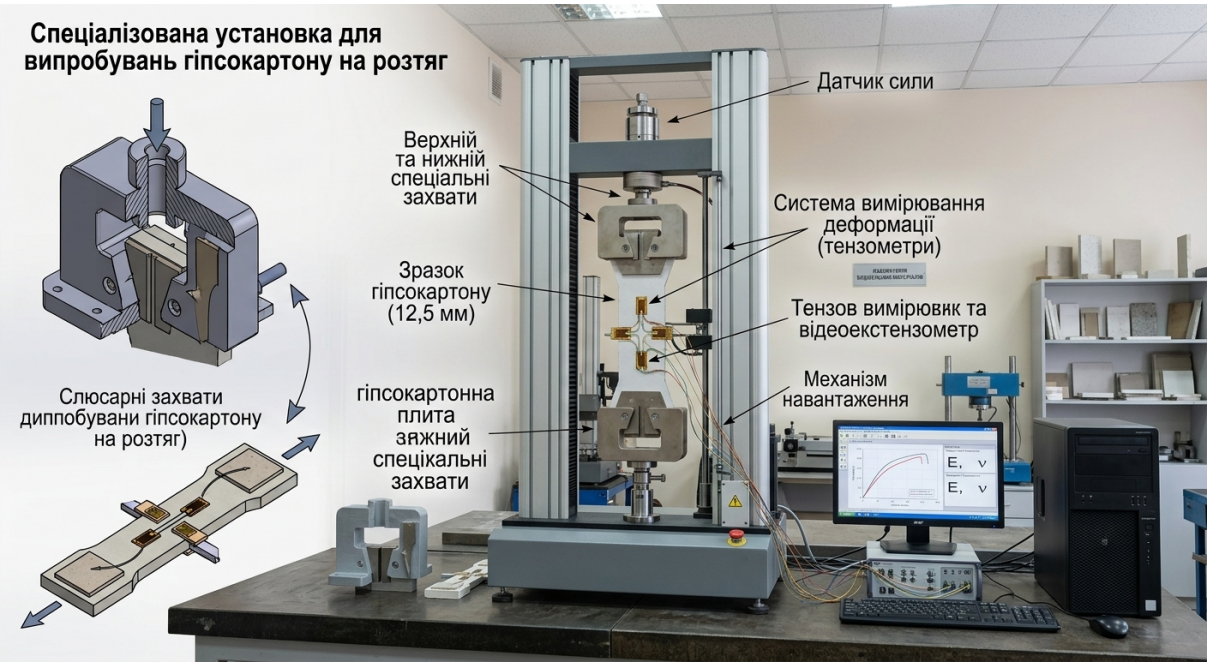


Рисунок 3 — Схема установки для випробування зразків на осьовий розтяг: 1 — зразок; 2, 3 — траверси; 4 — блок; 5 — вантажі; 6 — тензорезистори.

Випробуваний зразок закріплювали в нерухомій траверсі. Через рухому траверсу на нього передавали розтягувальне навантаження, створюване системою вантажів.

Зразки для випробувань на розтяг мали форму вісімки з торцевими накладками в зонах захоплення. Оскільки гіпсокартонні плити є ортотропним матеріалом, зразки вирізали в поздовжньому та поперечному напрямках, тобто під кутами 0° і 90° відносно головних осей ортотропії.

Випробування проводили на одношарових і двошарових зразках, вирізаних уздовж та поперек головних напрямків матеріалу. Окрему серію становили двошарові зразки, у лицьовому шарі яких моделювали стик. Для його формування використовували шпаклювальний матеріал «Фугенфюллер» і сітчасту армувальну стрічку. Лицьову поверхню таких зразків додатково армували склохолстом, закріпленим універсальним полівінілацетатним клеєм.

До зразків прикладали розтягувальне навантаження ступенями, що становили приблизно 5 % очікуваного руйнівного навантаження P_розр. Під час випробувань реєстрували навантаження до моменту руйнування, а також поздовжні ε_1 і поперечні ε_2 деформації.

За результатами експериментів визначали модулі пружності E_1 та E_2 а також коефіцієнти Пуассона ν_12 і ν_21 для поздовжнього й поперечного напрямків відповідно.

2.4 Методика випробування модельних зразків на чистий зсув

Випробування на зсув проводили за заданих умов деформування зразка з квадратною робочою ділянкою. Зразки розміром 300 × 200 мм вирізали з гіпсокартонних плит у двох напрямках таким чином, щоб головні осі симетрії матеріалу були паралельними сторонам робочої ділянки.

У зонах закріплення зразки підсилювали накладками. Для контролю деформацій на всіх гранях і діагоналях зразка наклеювали тензорезистори. Одну грань зразка закріплювали на нерухомій траверсі, а до протилежної прикладали дотичне навантаження, яке передавалося від системи вантажів через рухому траверсу.

Навантаження збільшували ступенями, орієнтовно по 5 % очікуваного руйнівного навантаження. У процесі випробувань фіксували відносний зсув на межі пропорційності та в момент руйнування. Для кожного зразка реєстрували прикладене навантаження й зміни деформацій уздовж усіх граней і діагоналей до моменту руйнування.

Упродовж експерименту показання тензорезисторів, розташованих уздовж граней зразка, залишалися практично незмінними. Водночас одна

діагональ подовжувалася, а інша скорочувалася, що свідчило про виникнення зсувних деформацій.

За навантаження, що становило приблизно 50 % від руйнівного, було чути характерний тріск, хоча видимих тріщин на поверхні зразків не спостерігалося. Руйнування відбувалося шляхом зрізу вздовж площин, паралельних напрямку прикладеного навантаження.

За результатами випробувань будували графіки залежності відносного зсуву, що характеризувався зміною кута γ від прикладеного навантаження. На основі отриманих даних визначали модуль зсуву матеріалу.

Результати випробувань зразків, вирізаних у поздовжньому та поперечному напрямках, засвідчили лінійний характер залежності між навантаженням і відповідними деформаціями. Для досліджених зразків отримано однакові значення модуля зсуву незалежно від напрямку вирізання.

2.5 Випробування на міцність, тріщиностійкість і деформативність стиків одно- та двошарових гіпсокартонних зразків під час згину

Для встановлення закономірностей роботи стикових з'єднань проведено експериментальні дослідження міцності, тріщиностійкості та деформативності одно- і двошарових гіпсокартонних елементів зі стиками, виконаними за допомогою гвинтових і клейових з'єднань.

Для виготовлення дослідних зразків із гіпсокартонних плит завтовшки 12,5 мм вирізали по два фрагменти розміром 200 × 300 мм. Фрагменти попарно з'єднували вздовж довгої сторони відповідно до технології виробника (рис.4).

Перед нанесенням шпаклювального матеріалу зворотний бік стику закривали клейкою стрічкою, після чого встановлювали опорні рейки для забезпечення стабільності з'єднання під час формування шва.



Рисунок 4 — Послідовність технологічних операцій під час підготовки зразків зі стиковими з'єднаннями.

Одно- та двошарові зразки розміром 300 × 400 мм виготовляли в кількості 40 шт. із вологостійких гіпсокартонних плит завтовшки 12,5 мм. Для заповнення стиків використовували шпаклювальні суміші.

Крайки зразків підготовлювали відповідно до технічної документації виробника. Для шпаклювальної суміші формували фаску під кутом 45° на глибину, що дорівнювала приблизно третині товщини плити.

Для армування швів застосовували сітчасту армувальну стрічку типу «серпянка». Перед нанесенням шпаклювального матеріалу зворотний бік стику проклеювали клейкою стрічкою (рис.5).

Перший шар шпаклівки наносили з одночасним утаплюванням армувальної стрічки. Після його висихання широким шпателем завширшки 200–300 мм наносили другий, вирівнювальний шар шпаклівки.



Рисунок 5 — Підготовка стику гіпсокартонних плит до випробування на згин.

У програмі досліджень передбачали фіксацію таких показників:

- фотографування процесу випробування;

- визначення модуля пружності під час згину;

- побудова графіків залежності навантаження від прогину на кожному етапі навантаження;

- визначення навантаження, за якого виникають перші тріщини;

- визначення руйнівного навантаження;

- встановлення характеру руйнування зразків.

Виготовлені зразки витримували протягом семи діб у лабораторних умовах за температури (23±2)°С та відносної вологості (50±5)%. Після висушування клейку стрічку знімали.

Під час виготовлення двошарових зразків спочатку з'єднували між собою шари гіпсокартону, після чого виконували аналогічні операції з формування стику, що й для одношарових зразків. Для додаткового армування поверхню окремих зразків підсилювали склохолстом, закріпленим універсальним полівінілацетатним клеєм.

Для проведення експериментальних досліджень було спроєктовано та виготовлено спеціальну установку, яка давала змогу випробовувати різні типи одно- і двошарових гіпсокартонних елементів за схемами три- та чотириточкового згину.

Навантаження на зразок передавали через траверсу від гідравлічного домкрата та реєстрували за допомогою динамометра. Прогин зразка, що характеризував відносне переміщення елементів навантажувальної системи, вимірювали прогиноміром з індикатором годинникового типу та ціною поділки 0,01 мм.

Зразки навантажували безперервно зі швидкістю (250±125) Н/хв. Похибка вимірювань становила до 1 %.

У процесі випробувань реєстрували прикладене навантаження, момент появи перших тріщин і прогин зразків на всіх етапах навантаження аж до руйнування (табл.3).

Таблиця 3 — Характеристика одно- та двошарових зразків із поперечними стиками

Параметр	Характеристика
Розміри зразків	a=(400±5)\ мм; b=(300±5)\ мм
Тип А	Поздовжній еталонний зразок
Тип Б	Поперечний еталонний зразок
Кількість	Шість зразків для кожної серії випробувань
Розташування картону	Лицьовий картон у зоні розтягу
Конструкція	Два шари вологостійкого гіпсокартону завтовшки 12,5 мм
Кріплення шарів	Гвинти TN 25
Типи з'єднань	Гвинтові та комбіновані гвинтові й клейові
Шовний матеріал	З армувальною стрічкою
Додаткове армування	Малярний склохолст на універсальному полівінілацетатному клеї для відповідних серій зразків

Отримані результати використовували для оцінювання міцності стикових з'єднань, їхньої тріщиностійкості та деформативності, а також для порівняння роботи одно- і двошарових гіпсокартонних елементів за різних способів з'єднання та додаткового армування.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Під час випробувань на зсув руйнування зразків відбувається по площинах, паралельних напрямку прикладання руйнівного навантаження. До моменту руйнування деформування всіх типів зразків має лінійний характер. Міцність на зсув зразків типу А у 1,7 раза вища, ніж у зразків іншого типу. Модулі зсуву зразків типів А і Б на межі пропорційності відрізняються незначно — до 5 %.

2. Випробування на згин одношарових і двошарових зразків зі стиком без підсилення показали, що межа тріщиностійкості становить 33–42 % від межі міцності за згину.
3. Під час випробувань на згин зразки, армовані склохолстом, до моменту руйнування деформувалися без видимих тріщин на лицьових поверхнях. Для одношарових зразків підсилення склохолстом забезпечує збільшення межі тріщиностійкості у 1,8 раза.
4. У двошарових зразках одночасне застосування клейового з’єднання та підсилення склохолстом забезпечує збільшення міцності й тріщиностійкості у 1,75 раза. При цьому межа тріщиностійкості досягає межі міцності за згину, а руйнування зразків відбувається як по стику, так і по суцільному перерізу.

Розділ 3. Комп'ютерне моделювання

3.1 Архітектурно-планувальне рішення та основні конструктивні елементи несучого каркасу

Об’єктом проєктування є будівля житлового будинку острівного типу, напівкруглої форми в плані. Проєкт розроблено відповідно до технічного завдання.

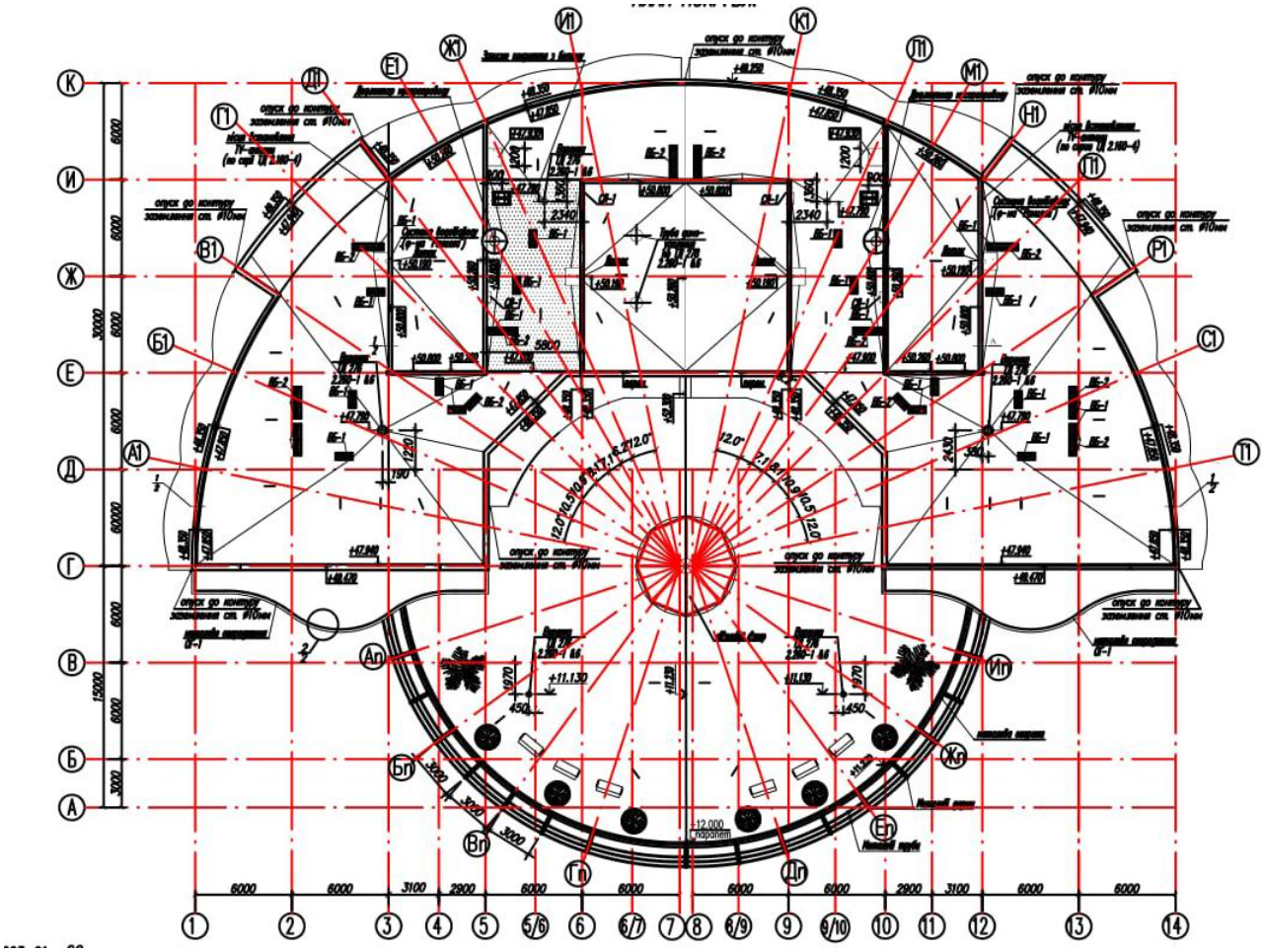


Рисунок 3.1 – План першого поверху

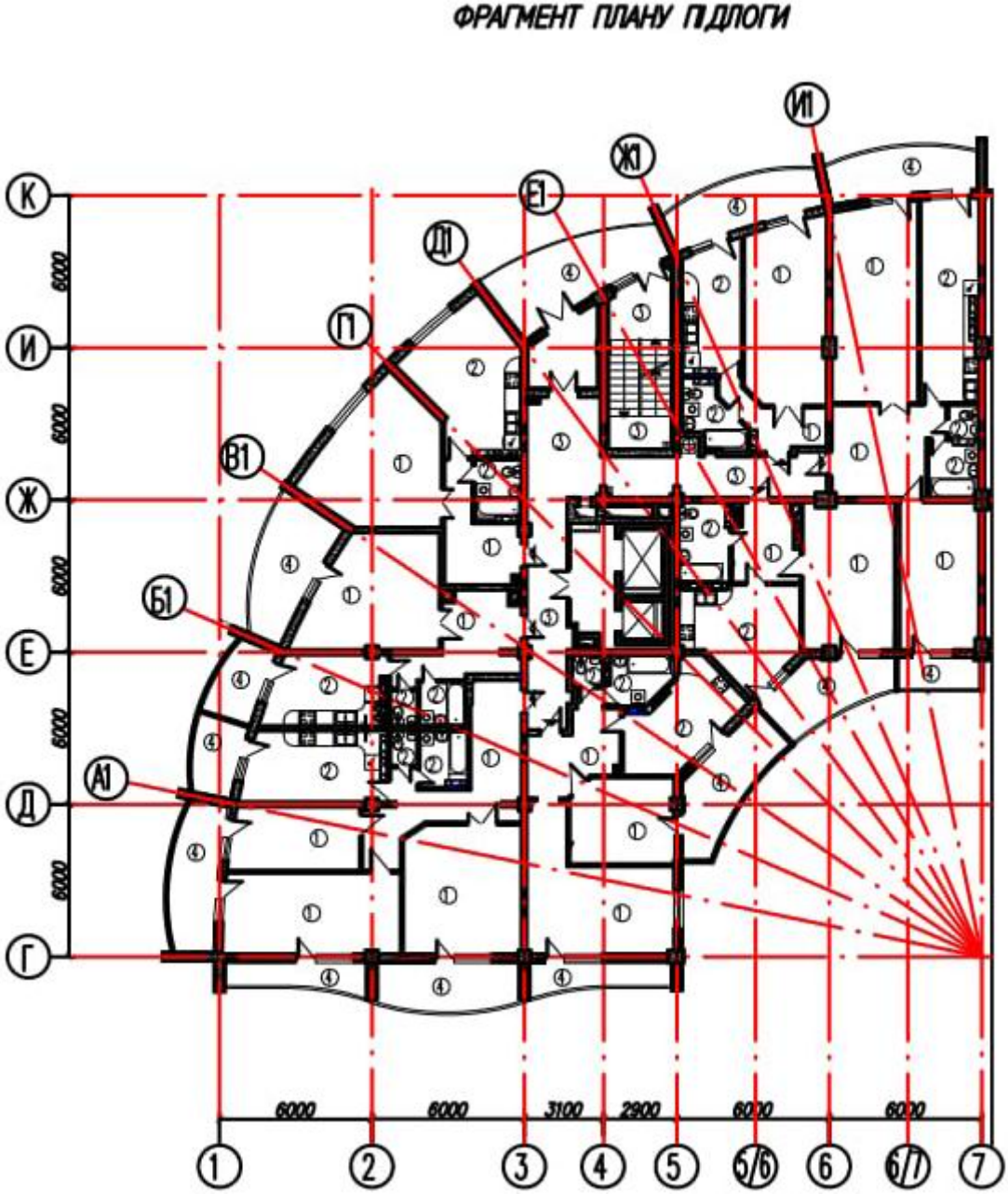


Рисунок 3.2 – Фрагмент плану підлоги

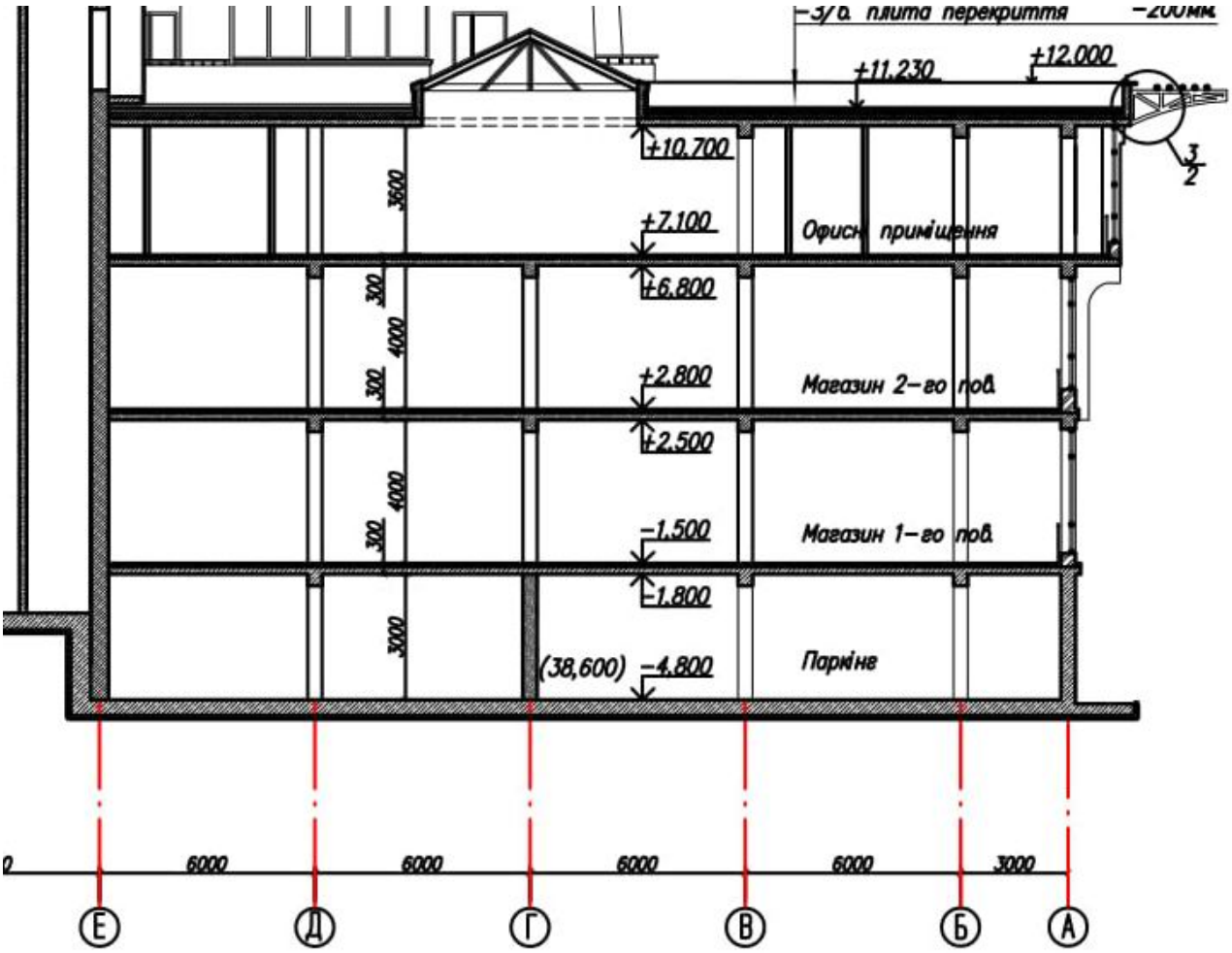


Рисунок 3.3 – Розріз

Просторова робота будівлі забезпечується жорсткою конструктивною системою, сформованою на основі монолітного залізобетонного рамно-в'язевого каркаса. Основними елементами, що формують просторову жорсткість і загальну стійкість споруди, є вертикальні колони, горизонтальні ригелі, діафрагми жорсткості та диски міжповерхових перекриттів. Їх взаємодія забезпечує сумісне сприйняття вертикальних і горизонтальних навантажень, зокрема тих, що виникають унаслідок сейсмічних впливів.

Для обмеження передачі динамічних навантажень між окремими частинами споруди та забезпечення їх незалежного деформування будівлю розділено на блок-секції. Між ними передбачено антисейсмічні шви, які дають змогу уникнути небажаної взаємодії суміжних конструктивних блоків під час землетрусів.

Просторовий розрахунок несучої системи виконано із застосуванням програмного комплексу «ЛІРА». Під час розрахункового обґрунтування враховано сейсмічні навантаження, що відповідають інтенсивності землетрусу 9 балів. З огляду на геометричні параметри окремої блок-секції, які становлять 30 × 30 м, у прийнятій розрахунковій моделі окремий розрахунок на кручення не виконувався.

Фундаменти та основи.

Тип фундаментної системи обрано з урахуванням інженерно-геологічних умов будівельного майданчика та результатів розрахунків взаємодії споруди з ґрунтовою основою. Як фундаментне рішення прийнято буронабивні залізобетонні палі, здатні передавати навантаження від будівлі на глибоко розташовані несучі ґрунтові шари.

Проєктом передбачено застосування паль діаметром 800 мм. Їхня довжина залежить від конструктивної частини будівлі: під вбудовано-прибудованим об'ємом вона становить 15–16 м, а під основною житловою частиною — 21 м. Палі влаштовуються із застосуванням інвентарних обсадних труб, які витягуються після формування бетонного стовбура.

За характером взаємодії з ґрунтовою основою палі належать до висячого типу. Їхня несуча здатність формується переважно завдяки опору ґрунту по бічній поверхні та взаємодії нижнього кінця палі з відповідним геологічним шаром.

Для фундаментів прибудованої частини нижні кінці паль заглиблюються в інженерно-геологічний шар ІГЕ-5, представлений грубоуламковими ґрунтами з включеннями валунів, гальки та гравію скельного вапняку. Заповнювачем між уламками слугує коричнево-жовтий суглинок, вміст якого становить орієнтовно 20–25 %.

Під житловим блоком палі доводяться до шару ІГЕ-7, складеного темно-сірими, місцями майже чорними аргілітами. Ці породи характеризуються листуватою, лускуватою та плитчастою структурою, місцями містять прошарки кварцового пісковику.

Оскільки в наявних матеріалах інженерно-геологічних вишукувань відсутні достовірні значення межі міцності аргілітів шару ІГЕ-7 за одноосьового стиску, остаточне підтвердження розрахункової несучої здатності паль потребує додаткових досліджень. Тому перед початком розроблення робочої документації передбачено проведення натурних статичних випробувань буронабивних паль у характерних точках пальового поля. Отримані результати дадуть змогу уточнити фактичні характеристики взаємодії паль із ґрунтовою основою, перевірити прийняті розрахункові передумови та, за необхідності, оптимізувати параметри фундаментної конструкції з метою зниження вартості будівництва.

Бетонування паль передбачено бетонною сумішшю класу В25. Об'єднання паль в єдину фундаментну систему здійснюється за допомогою монолітних залізобетонних ростверків плитного типу. Для прибудованої частини прийнято товщину ростверку 700 мм, для основного житлового об'єму — 1200 мм. Матеріалом ростверків також є бетон класу В25. З'єднання ростверкових плит із палями передбачено жорстким, із відповідним конструктивним анкеруванням арматури паль у тілі ростверку.

Несуча система та огороджувальні конструкції.

Підземна частина будівлі сформована монолітними залізобетонними стінами, які одночасно виконують несучі та огороджувальні функції. Для захисту конструкцій від проникнення ґрунтової вологи передбачено гідроізоляційний захист із використанням матеріалів системи «Пенетрон». Зовнішні поверхні підвальних стін додатково захищаються теплоізоляційним покриттям GSM Керамік завтовшки 0,5–1,0 мм.

Основу надземної несучої системи становлять монолітні залізобетонні колони, ригелі та діафрагми жорсткості. Усі зазначені елементи запроєктовані з бетону класу В25. Просторову арматурну систему формують окремі стрижні та зварні каркаси, що забезпечують необхідне армування конструкцій і сумісну роботу їхніх складових.

Міжповерхові перекриття виконуються у вигляді суцільних монолітних залізобетонних плит завтовшки 200 мм. Для їх виготовлення передбачено бетон

класу В25, а робоче армування здійснюється стрижневою арматурою класу А400С. Такі перекриття забезпечують не лише сприйняття вертикальних експлуатаційних навантажень, але й виконують функцію горизонтальних дисків, що передають зусилля на вертикальні елементи системи просторової жорсткості.

Заповнення каркаса в межах підземного поверху передбачено монолітним залізобетоном. Для зовнішніх стін надземної частини використано пінобетонні блоки середньою густиною 600 кг/м³ і завтовшки 300 мм. Для підвищення просторової цілісності кладки передбачено її горизонтальне армування сітками з інтервалом 600 мм за висотою.

З'єднання стінового заповнення з несучим каркасом здійснюється за допомогою гнучких анкерних зв'язків. При цьому між кладкою та елементами каркаса залишаються деформаційні проміжки, передбачені проєктом у вигляді швів завширшки 20 мм. Такий підхід дозволяє враховувати відносні переміщення конструкцій під час експлуатації та сейсмічних впливів. Зони віконних і дверних прорізів додатково підсилюються монолітними залізобетонними стійками.

Зовнішнє утеплення стін передбачено плитами мінераловатного утеплювача FASROCK густиною 145 кг/м³ і завтовшки 50 мм.

Внутрішні перегородки та вертикальні комунікації.

Внутрішній простір будівлі поділяється системою ненесучих перегородок, матеріал і товщина яких визначаються функціональним призначенням приміщень. Для міжквартирного розмежування застосовуються дрібноштучні пінобетонні блоки завтовшки 200 мм. Внутрішньоквартирні перегородки виконуються з аналогічних блоків, але зменшеної товщини — 100 мм. У приміщеннях санітарно-побутового призначення використовується керамічна цегла.

Для підвищення стійкості перегородок до деформацій кладку передбачено об'єднувати в конструктивно цілісну систему за допомогою армувальних сіток, розташованих з обох боків стіни. Зв'язування протилежних

сіток здійснюється поперечними металевими скобами. Поверхню армованої кладки передбачено покривати цементно-піщаним штукатурним розчином.

Вертикальне переміщення пасажирів і вантажів забезпечується системою ліфтового обладнання. У житловій частині будівлі передбачено два типи пасажирських ліфтів виробництва Щербінського ліфтового заводу: моделі ПП-0411Щ вантажопідйомністю 400 кг зі швидкістю руху кабіни 1 м/с та ПП-0621Щ вантажопідйомністю 630 кг із аналогічною швидкістю.

У вбудовано-прибудованій частині передбачено встановлення вантажного ліфта вичавного типу ПГ-1005В, розрахованого на навантаження до 1000 кг, зі швидкістю переміщення 0,5 м/с. Крім того, запроєктовано пасажирські ліфти системи Spirit виробництва компанії ThyssenKrupp Elevator із вантажопідйомністю 450 кг і швидкістю руху 1 м/с.

Шахти ліфтів формуються монолітними залізобетонними стінами з бетону класу В25. Таке конструктивне виконання забезпечує необхідну просторову жорсткість шахт і надійність їх сполучення з основними елементами будівлі.

Сходові конструкції та конструктивні елементи прорізів.

Сходові площадки передбачено виготовляти з монолітного залізобетону класу В25. Сходові марші мають комбіновану конструкцію: залізобетонні проступи встановлюються на металеві косоури, поверхня яких оштукатурюється по армувальній сітці. Для врахування можливих температурних і деформаційних переміщень одна зі сторін опирання косоурів виконується рухомою.

Конструкції перемичок над віконними та дверними прорізами запроєктовано монолітними залізобетонними. Для їх виготовлення передбачено бетон класу В15.

Покрівля та зовнішнє опорядження.

Завершення будівлі виконано у вигляді плоскої покрівлі, пристосованої до експлуатації. Відведення атмосферних опадів організоване через внутрішню систему водостоку. Як основний гідроізоляційний шар використовується рулонний бітумно-полімерний матеріал «Уніфлекс», модифікований для

забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей покрівельного покриття.

Теплозахист покриття забезпечується мінераловатними плитами DACHROCK густиною 175 кг/м³ та завтовшки 100 мм.

Огородження балконів передбачено комбінованого типу. Основою слугує цегляна кладка з подальшим штукатурним опорядженням, доповнена декоративними металевими ґратами.

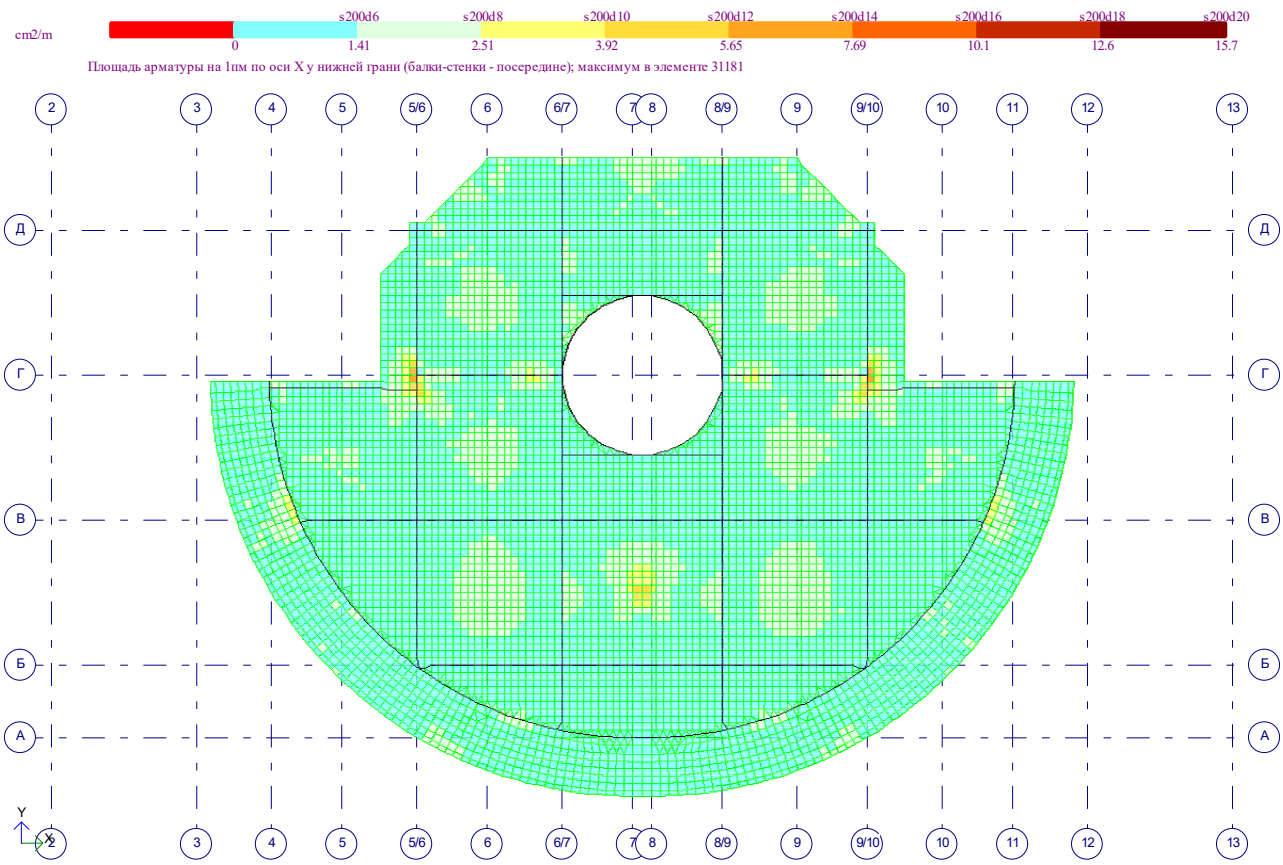
Світлопрозорі конструкції фасадів представлені індивідуально виготовленими металопластиковими віконними блоками з подвійним склінням. Для вітражного заповнення застосовуються металеві конструкції системи REHAU білого кольору.

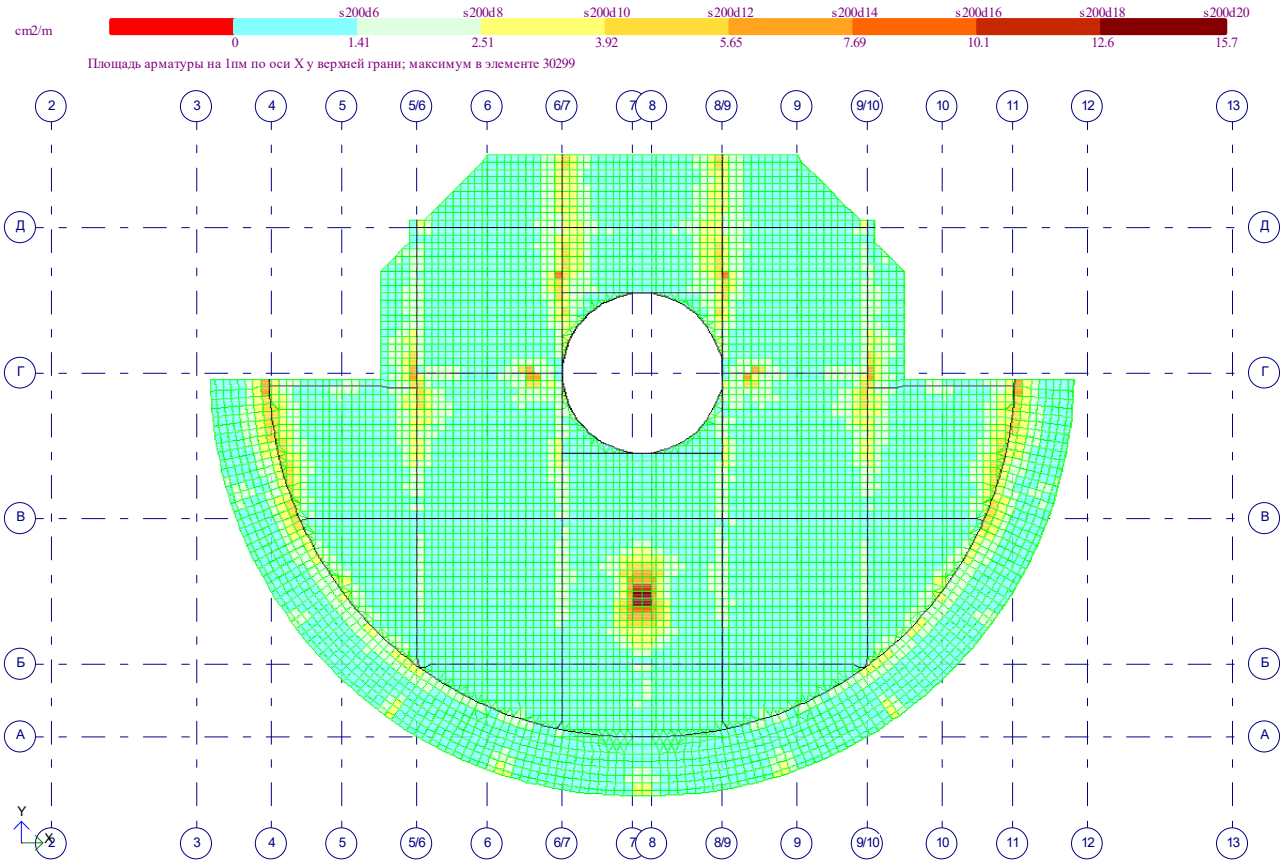
Вхідні двері до квартир передбачено металевими, з підвищеною стійкістю до механічних пошкоджень.

3.2 Розрахунок несучого каркаса

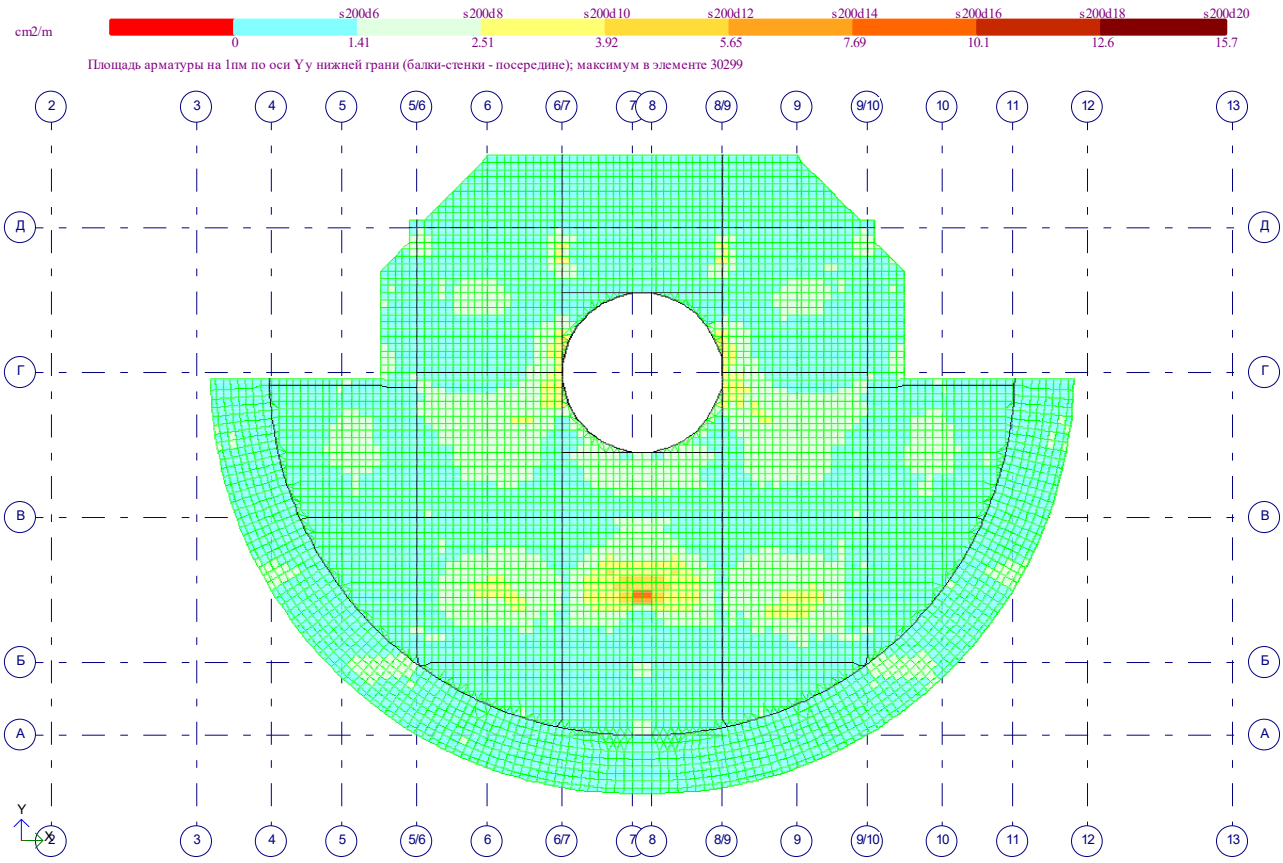
Для розрахунку використано програмний комплекс SCAD Office.

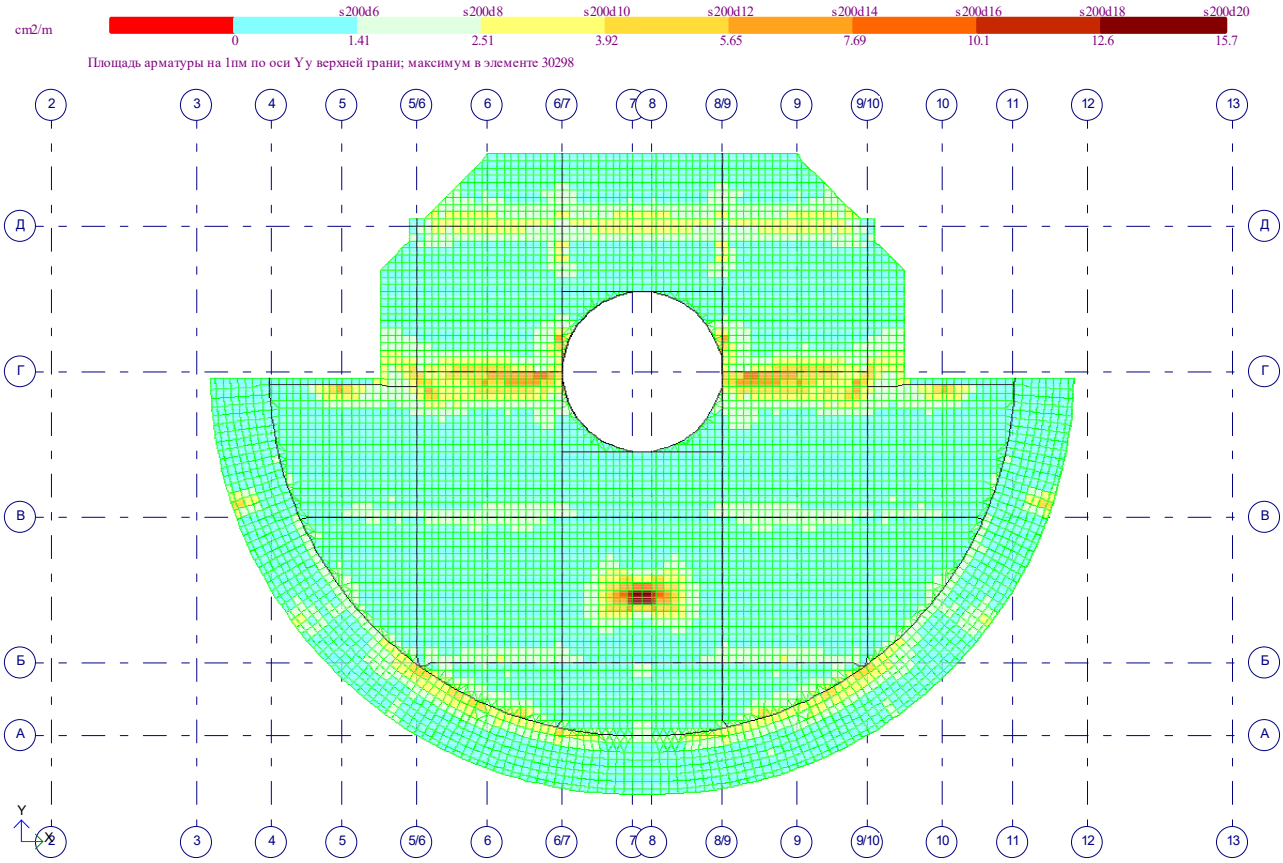
Нижче представлені розрахункові схеми несучого каркасу.





					ГК 26. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





					ГК 26. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Об’єктом дослідження в розділі є несучий каркас покриття будівлі, сформований залізобетонними конструкціями, криволінійними фермами та гіпсокартонними елементами. Основну увагу приділено дослідженню його напружено-деформованого стану, особливостей передавання навантажень і впливу умов закріплення опорних вузлів на роботу конструктивної системи.

1. На підставі аналізу геометричних характеристик покриття та особливостей його конструктивного виконання встановлено, що застосування традиційної ребристо-кільцевої системи з рівномірним розташуванням несучих елементів не забезпечує оптимального врахування специфіки великопролітної конструкції. Тому для забезпечення необхідної просторової жорсткості та раціонального розподілу зусиль прийнято конструктивну схему на основі серпоподібних криволінійних ферм і горизонтальних ґратчастих в’язей.

2. Розроблена розрахункова модель несучого каркаса дає змогу оцінити характер його роботи під дією прийнятих статичних навантажень, визначити розподіл внутрішніх зусиль і деформацій, а також встановити найбільш навантажені ділянки конструкції. Особливу увагу приділено взаємодії окремих несучих елементів та забезпеченню їх спільної роботи в межах просторової системи покриття.

3. Під час чисельного моделювання розглянуто три варіанти закріплення опорних вузлів несучого каркаса: шарнірно-нерухомий, шарнірно-рухомий і пружно-податливий. Порівняння отриманих результатів дозволило встановити залежність напружено-деформованого стану конструкції від характеру опорного закріплення та оцінити вплив податливості вузлів на перерозподіл зусиль у несучих елементах.

4. Результати розрахунків засвідчили, що шарнірно-нерухома схема закріплення забезпечує відповідний рівень жорсткості конструкції за відсутності істотних температурних деформацій і переміщень суміжного покриття. Водночас застосування пружно-податливих опорних вузлів дає змогу враховувати можливі взаємні переміщення конструктивних елементів,

зменшувати концентрацію напружень в окремих зонах та покращувати умови роботи несучого каркаса за складніших експлуатаційних впливів.

5. Порівняльний аналіз розрахункових схем підтвердив, що вибір опорних вузлів є одним із визначальних чинників формування напружено-деформованого стану несучого каркаса. Під час проєктування доцільно враховувати не лише міцність окремих елементів, але й загальну деформативність системи, сумісність переміщень її складових та можливість виникнення додаткових зусиль унаслідок температурних і експлуатаційних впливів.

Загальний висновок. Проведене дослідження підтверджує, що раціональне компонування несучого каркаса та обґрунтований вибір конструкції опорних вузлів мають визначальний вплив на його напружено-деформований стан. Найбільш доцільним є таке конструктивне рішення, яке забезпечує необхідну просторову жорсткість і міцність системи за одночасного врахування можливих температурних та експлуатаційних деформацій.

Розділ 4. Охорона праці

4.1 Загальні положення з охорони праці під час проведення досліджень

Охорона праці є важливою складовою організації науково-дослідної діяльності, спрямованої на вивчення фізико-механічних властивостей гіпсокартонних плит, закономірностей їх деформування та особливостей напружено-деформованого стану тонкостінних великорозмірних гіпсокартонних оболонок. Проведення експериментальних досліджень передбачає виготовлення дослідних зразків, механічну обробку матеріалів, монтаж вимірювальних систем, виконання навантажень і опрацювання отриманих результатів за допомогою комп'ютерної техніки.

Під час виконання зазначених робіт необхідно забезпечувати безпечні умови праці, запобігати травмуванню працівників, виникненню професійних захворювань і аварійних ситуацій. Організація робочого процесу повинна відповідати вимогам чинного законодавства України у сфері охорони праці, пожежної безпеки та санітарно-гігієнічних норм.

Основними потенційними небезпечними та шкідливими виробничими факторами під час проведення досліджень є:

- механічні травми під час різання, фрезерування та оброблення гіпсокартонних плит;
- утворення пилу гіпсового осердя, картонних волокон і дрібних частинок матеріалу;
- травмування під час перенесення великогабаритних плит, металевих профілів і дослідних конструкцій;
- защемлення рук під час монтажу каркаса, встановлення зразків і закріплення елементів випробувального обладнання;
- падіння зразків, інструментів та окремих елементів конструкцій;
- ураження електричним струмом у разі пошкодження електроінструментів, кабелів або вимірювального обладнання;
- підвищений рівень шуму та вібрації під час використання механізованого інструменту;

- виникнення пожежі внаслідок несправності електрообладнання або порушення правил його експлуатації;
- перенапруження зорового апарату та опорно-рухового апарату під час тривалої роботи за комп’ютером.

Для зниження виробничих ризиків необхідно забезпечувати належний технічний стан обладнання, організовувати робочі місця відповідно до характеру виконуваних операцій, застосовувати засоби індивідуального захисту та дотримуватися встановлених правил безпечної роботи.

4.2. Вимоги безпеки під час виготовлення та оброблення гіпсокартонних зразків

Виготовлення дослідних зразків гіпсокартонних плит передбачає виконання операцій з розмічання, різання, свердління, фрезерування, згинання та підготовки поверхонь до встановлення вимірювальних датчиків. Кожна з цих операцій потребує дотримання відповідних заходів безпеки.

Перед початком роботи необхідно перевірити справність ручного та електричного інструменту, надійність його кріплення, цілісність електричних кабелів і захисних пристроїв. Робоча поверхня повинна бути рівною, стійкою та достатньою за розмірами для розміщення заготовки.

Під час різання гіпсокартонних плит необхідно надійно фіксувати заготовку, використовувати справний інструмент і виконувати різання в напрямку, що виключає потрапляння рук у робочу зону. Не допускається утримування заготовки безпосередньо поблизу ріжучої кромки або виконання операцій несправним інструментом.

Під час фрезерування гіпсокартону утворюються дрібнодисперсні частинки, які можуть подразнювати органи дихання та слизові оболонки. Для зменшення запиленості необхідно використовувати місцеву витяжну вентиляцію або відповідні системи пиловидалення. За необхідності застосовують захисні окуляри та респіратори, підібрані відповідно до характеру пилу й умов роботи.

Очищення робочих поверхонь від пилу та залишків матеріалу слід виконувати способами, що не спричиняють повторного піднімання пилу в повітря. Не рекомендується видаляти пил стисненим повітрям або сухим підмітанням, якщо це призводить до значного його розповсюдження.

Під час згинання гіпсокартонних плит у зволоженому стані необхідно забезпечити стійке положення шаблону та надійну фіксацію заготовки. Згинання слід виконувати поступово, не допускаючи неконтрольованого руйнування плити, раптового вивільнення її пружних деформацій або падіння елементів конструкції.

Якщо для виготовлення зразків застосовуються шпаклювальні суміші, клеї та інші хімічні матеріали, необхідно дотримуватися інструкцій виробника, забезпечувати вентиляцію приміщення та уникати контакту матеріалів зі шкірою й очима.

Перенесення великогабаритних гіпсокартонних плит і металевих профілів потрібно здійснювати з урахуванням їхніх габаритів, маси та можливості пошкодження кромок. За необхідності використовують допоміжні засоби переміщення або залучають додаткових працівників. Плити необхідно зберігати в стійкому положенні, запобігаючи їх перекиданню.

4.3. Безпека під час проведення лабораторних випробувань

Експериментальне визначення міцності, деформативності та тріщиностійкості гіпсокартонних зразків може здійснюватися із застосуванням випробувальних установок, силовимірювальних пристроїв, механічних тензометрів і електричних вимірювальних систем.

До початку випробувань необхідно перевірити технічний стан обладнання, справність вимірювальних приладів, надійність опор і пристроїв для закріплення зразків. Випробувальна установка повинна бути встановлена на стійкій основі та використовуватися відповідно до технічної документації виробника.

Зразок необхідно встановлювати в робочій зоні установки відповідно до прийнятої схеми навантаження. Його закріплення має виключати випадкове

зміщення, перекидання або неконтрольоване руйнування під час проведення експерименту.

Навантаження слід збільшувати поступово, контролюючи показники вимірювальних приладів і поведінку дослідного зразка. Під час випробування забороняється перебувати в небезпечній зоні, торкатися рухомих частин установки або коригувати положення зразка, якщо обладнання перебуває під навантаженням.

Особливу увагу потрібно приділяти випробуванням на згин і визначенню руйнівного навантаження. У процесі руйнування гіпсокартонної плити можливе відокремлення фрагментів гіпсового осердя та пошкодження картонного облицювання. Тому необхідно передбачати безпечне розташування оператора та, за потреби, застосовувати захисні екрани.

Монтаж і демонтаж тензорезисторів, датчиків переміщення та інших вимірювальних пристроїв слід виконувати після зняття навантаження й приведення установки в безпечний стан. Підключення електричних вимірювальних систем необхідно здійснювати відповідно до інструкцій виробника.

У разі виявлення несправності обладнання, появи стороннього шуму, пошкодження кріплень або порушення роботи вимірювальної системи випробування потрібно негайно припинити. Відновлення роботи допускається лише після усунення несправностей.

Після завершення експерименту навантаження знімають у встановленій послідовності, обладнання вимикають, а зруйновані зразки та залишки матеріалів прибирають із робочої зони після припинення небезпечних процесів.

4.4. Електробезпека під час використання лабораторного обладнання

Під час проведення досліджень можуть використовуватися електричні випробувальні установки, тензометричні системи, вимірювальні прилади, електроінструменти та персональні комп’ютери. Їх експлуатація потребує дотримання вимог електробезпеки.

Перед початком роботи необхідно перевірити цілісність ізоляції кабелів, стан штепсельних вилок, розеток і захисних пристроїв. Не допускається використання обладнання з пошкодженою ізоляцією, несправними вимикачами або ознаками перегрівання.

Електричне обладнання повинно підключатися до справної електричної мережі з відповідними засобами захисту. Застосування захисного заземлення, автоматичних вимикачів і пристроїв захисного відключення визначається конструкцією обладнання та вимогами електробезпеки.

Необхідно уникати розміщення електричних кабелів у місцях переміщення працівників, на гострих кромках конструкцій і в зонах можливого механічного пошкодження. Під час робіт із зволоженими гіпсокартонними зразками слід унеможливити потрапляння води на електричні з'єднання та вимірювальне обладнання.

Огляд, очищення та технічне обслуговування електроінструменту виконують після його відключення від електричної мережі. У разі виникнення несправності необхідно припинити роботу та повідомити відповідальну особу. Самостійне втручання в електричні системи, якщо воно не належить до компетенції працівника, не допускається.

4.5. Заходи щодо зниження виробничих ризиків

Для забезпечення безпечного виконання науково-дослідних робіт із гіпсокартонними плитами та оболонковими конструкціями необхідно реалізувати комплекс організаційних і технічних заходів.

До основних заходів належать:

- проведення інструктажів з охорони праці відповідно до характеру робіт;
- допуск до роботи з обладнанням лише осіб, які мають необхідну підготовку;
- перевірка технічного стану інструментів, випробувальних установок і вимірювальних систем;

- застосування місцевої витяжної вентиляції та засобів пиловидалення під час механічного оброблення матеріалів;
- використання захисних окулярів, відповідних респіраторів, рукавичок та інших засобів індивідуального захисту за необхідності;
- надійне закріплення зразків, шаблонів і металевих каркасів перед початком випробувань;
- обмеження доступу до небезпечних зон під час навантаження дослідних зразків;
- дотримання правил електробезпеки та пожежної безпеки;
- підтримання чистоти, належного освітлення й порядку на робочих місцях;
- раціональна організація роботи за комп'ютером і дотримання режиму праці та відпочинку.

Вибір конкретних заходів захисту повинен здійснюватися з урахуванням фактичного оснащення лабораторії, характеристик обладнання, виду виконуваних операцій та результатів оцінювання професійних ризиків.

Висновки

Під час проведення досліджень фізико-механічних властивостей гіпсокартонних плит, визначення їхніх деформацій і чисельного моделювання напружено-деформованого стану тонкостінних гіпсокартонних оболонок необхідно враховувати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з механічним обробленням матеріалів, проведенням лабораторних випробувань, використанням електрообладнання та тривалою роботою за комп'ютером.

Основними напрямами забезпечення безпеки є належна організація робочих місць, застосування справного обладнання, використання засобів індивідуального захисту, зменшення запиленості повітря, безпечне закріплення дослідних зразків і дотримання вимог електричної та пожежної безпеки.

Виконання передбачених організаційних і технічних заходів дає змогу знизити ймовірність травмування працівників, зменшити вплив шкідливих

виробничих факторів і створити належні умови для проведення достовірних експериментальних досліджень та чисельного аналізу будівельних конструкцій.

Список використаної літератури

1. Petrone C., Magliulo G., Manfredi G. Mechanical Properties of Plasterboards: Experimental Tests and Statistical Analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016. Vol. 28, No. 11. Article 04016129. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001630.

2. Bouterf A., Roux S., Hild F., Vivier G., Brajer X., Maire E., Meille S. Damage law identification from full field displacement measurement: Application to four-point bending test for plasterboard. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2015. Vol. 49. P. 60–66. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2014.06.001.

3. Alonso J. A., Reyes E., Gálvez J. C. Study of the cracking of sandwich panels of plasterboard and rockwool. *Materiales de Construcción*. 2013. Vol. 63, No. 311. P. 403–421. DOI: 10.3989/mc.2013.01412.

4. Alonso J. A., Reyes E., Gálvez J. C. Size effect in the fracture properties of sandwich panels of plasterboard and core of rock wool. *Materiales de Construcción*. 2019. Vol. 69, No. 333. Article e181. DOI: 10.3989/mc.2019.10617.

5. On the determination of the modulus of elasticity of plasterboard plates. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187. P. 923–930. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.001.

6. de Villanueva L., Lasheras F., del Rio M., Hernández-Olivares F. Mathematical model of the mechanical behaviour of gypsum plasterboard in bending. *Informes de la Construcción*. 1994. Vol. 45, No. 430. DOI: 10.3989/IC.1994.V45.I430.1141.

7. Sanahuja J., Dormieux L., Meille S., Hellmich C., Fritsch A. Micromechanical Explanation of Elasticity and Strength of Gypsum: From Elongated Anisotropic Crystals to Isotropic Porous Polycrystals. *Journal of Engineering Mechanics*. 2010. Vol. 136, No. 2. P. 239–253.

8. Tavares da Costa M. V., Arroyo B., Cicero S. Assessment of the fracture behavior of commercial quasi-brittle gypsum boards with and without reinforced paper fibers used in timber modules. *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 487. Article 142014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142014.

9. ASTM C1396/C1396M-24. *Standard Specification for Gypsum Board*. ASTM International, 2024. Офіційний документ: ASTM.

10. ASTM C473-24. *Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum Panel Products*. ASTM International, 2024. Офіційний документ: ASTM.

11. European Assessment Document EAD 070001-00-0504. *Gypsum plasterboards for load-bearing applications*. 2015. Документ містить методики визначення міцності при згині та модуля пружності гіпсокартонних плит.

12. Telue Y., Mahendran M. Behaviour and design of cold-formed steel wall frames lined with plasterboard on both sides. *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26, No. 5. P. 567–579. DOI: 10.1016/j.engstruct.2003.12.003.

13. Lee Y.-K., Miller T. H. Axial Strength Determination for Gypsum-Sheathed, Cold-Formed Steel Wall Stud Composite Panels. *Journal of Structural Engineering*. 2001. Vol. 127, No. 6. P. 608–615. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(608).

14. Landolfo R., Pali T., Bucciero B., Terracciano M. T., Shakeel S., Macillo V., Iuorio O., Fiorino L. Seismic response assessment of architectural non-structural LWS drywall components through experimental tests. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.04.011.

15. Liew Y. L., Gad E. F., Duffield C. F. 'Modularised' Closed-Form Mathematical Model for Predicting the Bracing Performance of Plasterboard Clad Walls. *Structural Engineering and Mechanics*. 2005. Vol. 20, No. 1. P. 45–67. DOI: 10.12989/sem.2005.20.1.045.

16. Gypsum Association. *Application of Gypsum Board to Form Curved Surfaces*. GA-226-08. Washington, DC: Gypsum Association. Офіційний PDF.

17. ASTM C645. *Standard Specification for Nonstructural Steel Framing Members*. ASTM International.

18. ASTM C754. *Standard Specification for Installation of Steel Framing Members to Receive Screw-Attached Gypsum Panel Products*. ASTM International.

19. EN 14195. *Metal framing components for gypsum plasterboard systems – Definitions, requirements and test methods*. European Committee for Standardization.

20. EN 520. *Gypsum plasterboards – Definitions, requirements and test methods*. European Committee for Standardization.

21. Timoshenko S. P., Woinowsky-Krieger S. *Theory of Plates and Shells*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1959. 580 p. ISBN 978-0-07-085820-6.

22. Flügge W. *Stresses in Shells*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1973. 526 p. DOI: 10.1007/978-3-642-88291-3.

23. Vlasov V. Z. *General Theory of Shells and Its Applications in Engineering*. NASA Technical Translation. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1964. 913 p.

24. Reddy J. N. *Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.

25. EN 1993-1-6. *Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures*. European Committee for Standardization.

26. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. DOI: 10.1016/C2009-0-24909-9.

27. Bathe K. J. *Finite Element Procedures*. 2nd ed. Watertown, MA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014. ISBN 978-0-9790049-5-7.

28. Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., Witt R. J. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 4th ed. New York: Wiley, 2002. ISBN 978-0-471-35605-9.

29. Hughes T. J. R. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987. 803 p. ISBN 0-13-317025-X.

30. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.