

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний
(факультет)
Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студента Бундюка Максима Ігоровича

(ПІБ)

академічної групи 132-22ск-2 ММФ

(шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

(за наявності)

за освітньо-професійною програмою _____

(офіційна назва)

«Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

на тему Дослідження впливу фізико-механічних властивостей теплоізоляційних матеріалів на характеристики теплопровідності сендвіч-панелей

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Сазанішвілі З. В.			
розділів:				
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Сазанішвілі З. В.			
Функціональний аналіз та моделювання об'єкта розробки	Сазанішвілі З. В.			
Інженерно-технологічний	Ротт Н. О.			
Експлуатаційний	Федоряченко С. О.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Гаркавенко Д. В.			

Дніпро
2025

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
конструювання, технічної
естетики і дизайну
(повна назва)

Федоряченко С.О.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«_____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню бакалавра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Бундюку Максиму Ігоровичу академічної групи 132-22ск-2 ММФ
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство
спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

на тему Дослідження впливу фізико-механічних властивостей теплоізоляційних матеріалів на характеристики теплопровідності сендвіч-панелей затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від _____ 2025р. № _____.

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Аналіз стану питання та постановка задач роботи	20.05.2025
Функціональний аналіз та моделювання об'єкта розробки	Проведення функціонально-вартісного аналізу елементів важеля. Інженерний розрахунок. Моделювання та аналіз властивостей за допомогою МСЕ.	05.06.2025
Інженерно-технологічний	Обґрунтування технології термічної обробки та дослідження мікроструктури	15.06.2025
Експлуатаційний	Визначення видів та методів контролю якості тримача ковша навантажувача	20.06.2025

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

Сазанішвілі З. В.

_____ (прізвище, ініціали)

Дата видачі 14.05.2025

Дата подання до екзаменаційної комісії 26.06.2025

Прийнято до виконання

Бундюк М. І.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 54 с., 24 рис., 6 табл., 14 джерел.

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ, СЕНДВІЧ-ПАНЕЛІ, МІНЕРАЛЬНА ВАТА, ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЯ, УТЕПЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Об'єкт розроблення – дослідження конструкційних та теплоізоляційних характеристик матеріалів конструкцій сендвіч-панелей.

Мета роботи – обґрунтувати вибір матеріалів та геометричних параметрів шарів сендвіч-панелі з точки зору забезпечення енергоефективності та довговічності конструкції.

Проведено дослідження конструкцій сендвіч-панелей шляхом вивчення теплових властивостей різних комбінацій матеріалів, що входять до складу виробу. Розглянуто вплив різних типів утеплювачів і облицювальних матеріалів на основні експлуатаційних характеристик сендвіч-панелей, зокрема теплопровідності, міцності, шумоізоляції та довговічності. Теоретично та експериментально проведено порівняння матеріалів з метою визначення найефективнішого поєднання, яке забезпечує високий рівень теплоізоляції, стійкість до зовнішніх впливів та пожежну безпеку.

Отримані результати становлять основу для подальшого підвищення енергоефективності будівельних конструкцій, розширення сфер застосування сендвіч-панелей у різних кліматичних умовах та поліпшення їхньої стійкості до динамічних навантажень, що забезпечить оптимальне співвідношення між експлуатаційною надійністю та економічною доцільністю виробництва.

ЗМІСТ

1 РОЗДІЛ. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ	8
1.1 Стан і тенденції розвитку технологій сендвіч-панелей	8
1.2 Матеріали, що використовуються для теплоізоляційного шару	9
1.3 Постановка задач роботи	14
2 РОЗДІЛ. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ.....	15
2.1 Основні відомості про сендвіч панелі та проведення ФВА	15
2.2 Побудова 3D-моделі конструкції та модульного каркасу для монтування в них сендвіч-панелей	19
2.3 Розрахунок МКЕ конструкції сендвіч-панелей	23
2.4 Висновки до розділу 2	27
3 РОЗДІЛ. ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	28
3.1 Обґрунтування вибору матеріалів для сендвіч-панелі	28
3.2 Технологічний процес виготовлення сендвіч-панелей.....	31
3.3 Роль модуля кислотності та вмісту неволокнистих включень у виробництві мінеральної вати	34
3.4 Висновки до розділу 3	37
4 РОЗДІЛ. ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....	39
4.1 Аналіз дефектів під час виробництва сендвіч-панелей	39
4.2 Умови експлуатації сендвіч-панелей.....	41
4.3 Утилізація та способи переробки матеріалів сендвіч-панелей	46
4.4 Висновки до розділу 4	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	49
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТОК А.....	53
ДОДАТОК Б	54

ВСТУП

У сфері сучасного будівництва, зокрема в напрямі впровадження новітніх будівельних матеріалів та енергоефективних технологій для зведення споруд, спостерігається зростаюча потреба у рішеннях, що поєднують швидкість монтажу, високу експлуатаційну ефективність та екологічну безпеку. Постійне вдосконалення технологій та зростання вимог до енергоефективності будівель зумовлюють активне використання нових конструкцій, зокрема сендвіч-панелей, які здатні забезпечити високий рівень теплоізоляції за відносно низької вартості та мінімальних витратах часу на будівництво. Сучасні проекти дедалі частіше передбачають застосування швидкозбірних систем, які дають змогу скоротити тривалість будівельних робіт, зменшити навантаження на фундаменти та підвищити загальну ефективність будівельного процесу.

У результаті численних технічних і наукових досліджень було запропоновано використання тришарових сендвіч-панелей як універсального будівельного матеріалу. Ці панелі є легкими, механічно міцними та мають високу теплоізоляційну здатність, що робить їх доцільними для застосування як у промисловому, так і в житловому будівництві. Досвід провідних українських виробників, зокрема компанії «ТПК», а також низки інших підприємств, підтверджує практичну ефективність таких рішень. Вони пропонують сендвіч-панелі з різними типами утеплювачів, зокрема пінополістиролом, базальтовою ватою та поліізоціануратом, що дозволяє варіювати тепло- і звукоізоляційні характеристики залежно від вимог проєкту.

Станом на сьогодні наукові установи та фахівці у галузі будівельної теплофізики, зокрема Інститут технічної теплофізики НАН України, досліджують питання підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій. Основна увага приділяється матеріалам із низькою теплопровідністю, стійкістю до вологи та високими вогнестійкими властивостями. За кордоном активні дослідження в цьому напрямі ведуться в університетах Німеччини, Польщі, США та Китаю, де розробляються гібридні

утеплювачі із наноструктурованими добавками. Проте, попри значні досягнення, залишаються низка технічних протиріч, пов'язаних із поєднанням високої теплоізоляції, малої ваги, достатньої міцності та екологічної безпеки.

Серед вимог до таких конструкцій виділяється складність забезпечення одночасно високої стійкості до динамічних навантажень і тривалої експлуатаційної надійності в умовах підвищеної вологості чи температурних коливань. Відомі на ринку рішення здебільшого є компромісними за одним чи кількома параметрами. Також існує недостатня кількість публікацій, присвячених комплексному порівнянню ефективності різних поєднань утеплювачів та облицювальних матеріалів саме в умовах, наближених до реальної експлуатації. У цьому контексті вивчення впливу складу та геометричних параметрів сендвіч-панелей є надзвичайно актуальним завданням.

Завдяки властивостям, які забезпечують високий рівень теплоізоляції, сендвіч-панелі дають змогу значно скоротити тепловтрати. Наприклад, стіна, утеплена пінополістиролом завтовшки 0,1 м, за теплопровідністю еквівалентна стіні з залізобетону товщиною 4,8 м, глиняної суцільної цегли – 1,75 м, силікатної пустотілої цегли – 1,9 м, керамзитобетону – 0,5 м або дерева – 0,35 м. Такі показники підтверджують доцільність використання сучасних утеплювачів у конструкціях панелей для ефективного захисту будівлі від втрат тепла. Завдяки своїй легкості та модульності сендвіч-панелі не потребують використання важкої спецтехніки, зменшують навантаження на фундамент і забезпечують тривалий термін експлуатації.

Сучасні технології виготовлення сендвіч-панелей передбачають застосування різноманітних облицювальних матеріалів, зокрема профнастилу, металевого листа, ОСБ або плівки із фольги. Це розширює дизайнерські можливості для архітектурного оформлення фасадів та інтер'єрів. Одночасно підвищується стійкість до зовнішніх впливів – вологості, ультрафіолету, корозії. Високі звукоізоляційні характеристики панелей сприяють створенню комфортного середовища як у житлових приміщеннях, так і в умовах

підвищеного шуму – на виробництві чи в міських районах із щільною забудовою.

На основі проведеного аналізу, а також чисельного моделювання в програмному середовищі ANSYS та подальших експериментальних досліджень із реальними зразками, було здійснено порівняння впливу різних матеріалів і товщин утеплювачів на температурні розподіли та ефективність теплового захисту. Такий підхід дозволив виявити найдоцільніші конструкційні поєднання з погляду теплоізоляції, пожежної безпеки та експлуатаційної стійкості.

Актуальність роботи полягає у необхідності пошуку ефективних рішень для удосконалення сендвіч-панелей, з урахуванням сучасних вимог до енергоощадності, швидкокомтованості та довговічності. Обґрунтуванням для проведення дослідження є наявність нерозв'язаних питань щодо вибору найбільш доцільного матеріального складу панелей, що забезпечує раціональний баланс між конструктивною міцністю та теплоізоляційними властивостями.

Метою роботи є обґрунтування вибору матеріалів та геометричних параметрів шарів сендвіч-панелі на основі аналізу їх теплоізоляційних, механічних та експлуатаційних характеристик з метою забезпечення високої енергоефективності, довговічності конструкції та відповідності сучасним вимогам до енергоощадних будівельних елементів. Результати можуть бути застосовані в проєктуванні енергоефективних конструкцій для житлового, комерційного та промислового будівництва.

1 РОЗДІЛ. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ

1.1 Стан і тенденції розвитку технологій сендвіч-панелей

Предметом дослідження в даній роботі є аналіз конструкцій сендвіч-панелей та матеріалів, що використовуються у їх виробництві для забезпечення оптимальних механічних і теплоізоляційних властивостей. З цією метою розглянуто низку сучасних наукових джерел, які висвітлюють новітні дослідження у цій сфері.

Дослідження В. Миронова та співавторів [1] присвячене використанню перфорованих металевих матеріалів у виробництві сендвіч-панелей. Автори доводять, що використання таких матеріалів у якості облицювального або внутрішнього шару дозволяє забезпечити збільшення міцності конструкцій та зниження їхньої ваги. Це є актуальним для будівництва енергоефективних споруд.

Дослідження механічних властивостей сендвіч-панелей з металевим облицюванням, проведене Л. Їгангом та співавторами, демонструє, що такі конструкції мають високу стійкість до навантажень та добре підходять для будівництва фасадів і покрівельних конструкцій. Водночас автори підкреслюють необхідність подальших досліджень впливу низьких температур і пожежної безпеки таких матеріалів [2].

Дослідження впливу температури на поведінку сендвіч-панелей, виконане С. Штайнеком та Й. Ланге, показало, що за підвищених температур жорсткість і міцність пінополіуретанового наповнювача можуть змінюватися. Це вимагає регулярного перегляду стандартів проектування та врахування температурних впливів при експлуатації таких панелей [3].

Робота М. Мохаммадабаді та співавторів зосереджена на оцінці конструкційних властивостей дерев'яних сендвіч-панелей. Дослідники визначили, що такі панелі можуть бути конкурентоспроможними у будівництві завдяки високій міцності, хорошим теплоізоляційним

характеристикам та екологічності. Водночас, порівняльний аналіз показав, що традиційні матеріали, такі як мінеральна вата, пінополістирол та поліізоціанурат, залишаються ефективними рішеннями для теплоізоляції та звукоізоляції сендвіч-панелей [4].

Проведено експериментальні та чисельні дослідження сендвіч-панелей з поліізоціануратним (PIR) наповнювачем. Дослідження підтвердило, що такі панелі мають хороші механічні характеристики та можуть ефективно використовуватися для покрівельних та стінових конструкцій, демонструючи кращі вогнестійкі властивості порівняно з пінополістиролом. Окреме дослідження присвячене поведінці жорсткого PIR-наповнювача в сендвіч-панелях. Дослідники встановили, що поліізоціанурат демонструє високу механічну міцність і стійкість до вогню, що робить його ефективним утеплювачем у будівництві. Водночас, дослідження показують, що стандартний підхід до розрахунку міцності такого наповнювача потребує коригування з урахуванням ортотропності матеріалу [5].

Аналізуючи сучасні наукові дослідження, можна зробити висновок, що сендвіч-панелі є перспективним будівельним матеріалом завдяки їхнім теплоізоляційним характеристикам. Використання мінеральної вати, пінополістиролу та поліізоціанурату залишається основним напрямом у виробництві сендвіч-панелей завдяки їхнім високим теплоізоляційним та вогнестійким властивостям. Водночас, дослідження механічних характеристик, температурних впливів та довговічності таких матеріалів є важливим аспектом для їх подальшого розвитку та оптимізації.

1.2 Матеріали, що використовуються для теплоізоляційного шару

Базальтова мінеральна вата – це ефективний теплоізоляційний матеріал з волокнистою структурою (рис. 1.1), що виробляється шляхом розплавлення та подальшого формування гірських порід, базальту або шлакових відходів металургійного виробництва. Процес виготовлення передбачає використання

синтетичних зв'язувальних компонентів, що забезпечують стабільність і довговічність матеріалу.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд базальтової мінвати

Однією з головних переваг мінеральної вати є її висока вогнестійкість, що робить її незамінною у будівництві об'єктів із підвищеними вимогами до пожежної безпеки. Матеріал здатний витримувати екстремальні температури без втрати своїх фізичних властивостей, запобігаючи поширенню полум'я.

Крім того, базальтова мінеральна вата має відмінні теплоізоляційні характеристики, що дозволяє ефективно знижувати тепловтрати будівель та сприяє енергоефективності. Завдяки низькому коефіцієнту теплопровідності, вона мінімізує витрати на опалення взимку та кондиціонування влітку, що є важливим фактором при зведенні сучасних екологічно ефективних будівель.

Важливою особливістю мінеральної вати є її здатність до поглинання шуму. Волокниста структура матеріалу забезпечує високий рівень звукоізоляції, що робить його придатним для використання в житлових, промислових та комерційних приміщеннях, де необхідно мінімізувати рівень шуму.

Попри численні переваги, мінеральна вата має певні недоліки. Вона є відносно важким матеріалом, що може ускладнювати процес монтажу, а також характеризується гігроскопічністю, тобто здатністю поглинати вологу. Це може призвести до зниження теплоізоляційних властивостей, тому при використанні мінеральної вати необхідно передбачати додаткові гідроізоляційні заходи.

Пінополістирол – це будівельний матеріал (рис. 1.2), який виготовляється шляхом спінювання полістиролу.

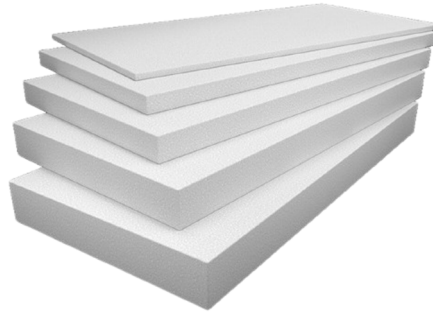


Рисунок 1.2 – Будівельний матеріал пінополістирол пресований

Пінополістирол завдяки своїм теплоізоляційним властивостям широко застосовується в будівництві для утеплення різних конструктивних елементів, зокрема стін та дахів. Його ефективність у зменшенні тепловтрат робить його придатним як для внутрішнього, так і для зовнішнього утеплення фасадів, забезпечуючи оптимальний мікроклімат у будівлях та знижуючи енергоспоживання. Він є легким і економічно вигідним матеріалом, а його головною перевагою є низька теплопровідність, що дозволяє забезпечувати стабільний температурний режим у приміщеннях за умов мінімальних енергозатрат на опалення.

Однак він є горючим матеріалом, що вимагає додаткових заходів пожежної безпеки. Під впливом високих температур він може не лише плавитися, а й виділяти токсичні речовини, що можуть становити небезпеку для здоров'я людей та навколишнього середовища. Це обмежує його використання в будівлях із підвищеними вимогами до пожежної безпеки та вимагає застосування вогнезахисних просочень або альтернативних негорючих матеріалів.

Пінополістирол виробляється різними способами. Безпресовий метод дозволяє отримати легкий матеріал з щільністю 12-50 кг/м³ і теплопровідністю 0,03-0,04 Вт/м·К. Пресований метод забезпечує більшу міцність матеріалу. Екструдований пінополістирол має дрібнопористу структуру, а його

теплопровідність становить 0,03-0,034 Вт/м·К. Автоклавний метод використовується досить рідко.

Пінополіуретан – це різновид полімерів, що містить газові пори (рис. 1.3). Його структура складається з твердих частин (5–10%) і газів, які не вступають у хімічну реакцію. Матеріал має низьку теплопровідність (0,019–0,035 Вт/м×К) і слабо пропускає вологу. Завдяки високій здатності прилипати до різних поверхонь, він добре фіксується на більшості матеріалів, окрім поліетилену та тефлону. Пінополіуретан легкий, але при цьому досить міцний. Він дорожчий за попередні матеріали, але надає будівлям додаткові переваги, зокрема високу стійкість до негативного впливу навколишнього середовища. Пінополіуретан має низьку теплопровідність, що знижує витрати на опалення взимку та кондиціонування влітку. За допомогою технології напилення можна рівномірно покривати поверхні будь-якої форми без утворення стиків, щілин чи порожнин. Це забезпечує ефективну тепло-, гідро- та шумоізоляцію. Безшовна структура запобігає проникненню холодного повітря, що перешкоджає утворенню конденсату.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд пінополіуретану (ППУ, поліуретанова піна)

Пінополіізоціанурат (ПІР) – ще один із широко використовуваних матеріалів для внутрішнього наповнення сендвіч-панелей. Завдяки своїм теплоізоляційним властивостям він і знайшов широке застосування в будівництві.

Пінополіізоціанурат (рис. 1.4) отримують внаслідок хімічної реакції між поліолом та ізоціанатом у співвідношенні два до одного, де поліолу додається

менше. Це викликає екзотермічну реакцію, в результаті якої утворюється пінополіуретан, посилений поліізоціануратними зв'язками.



Рисунок 1.4 – Сендвіч панель із використанням внутрішнього наповнювача пінополіізоціанурату (ПІР)

Матеріал відрізняється своєю низькою теплопровідністю, стійкістю до вологи та пари. Структура речовини виключає ймовірність підтримання горіння, що забезпечує самостійне затухання при можливій пожежі. У порівнянні з пінополіуретаном, ПІР має вищу міцність на розрив і стиснення, що робить його більш придатним для застосування в конструкціях із підвищеними вимогами до механічної стійкості. Саме тому його активно використовують у промисловому будівництві та для ізоляції об'єктів, що працюють в екстремальних умовах.

Як було зазначено, найчастіше для утеплення будівель застосовуються теплоізоляційні матеріали, серед яких мінеральна вата, пінополістирол, пінополіуретан і пінополіізоціанурат. Для кожного характерний особистий технологічний процес виготовлення, найпоширеним з точки зору практичного використання є метод виробництва базальтової мінеральної вати, що базується на плавленні базальтових гірських порід або металургійного шлаку з подальшим формуванням волокнистої структури за допомогою центрифугування чи обдування розплаву стисненим повітрям. У процесі виготовлення додаються синтетичні зв'язувальні компоненти, які забезпечують структурну цілісність та довговічність теплоізоляційного шару.

1.3 Постановка задач роботи

Під час розробки конструкції сендвіч-панелей мають бути враховані певні чинники, такі як теплові характеристики, механічні властивості, а також простота монтажу та довговічність. Сендвіч-панелі активно використовуються в будівництві завдяки своїм теплоізоляційним властивостям, легкості та швидкості встановлення. Конструкція сендвіч-панелі повинна бути достатньо жорсткою та міцною щоб витримувати фізико-механічні навантаження, мати високі теплоізоляційні властивості для зменшення тепловтрат, бути стійкою до впливу вологи та вогню, а також відповідати вимогам сучасних будівельних норм і стандартів.

Для успішного виконання мети кваліфікаційної роботи слід вирішити ряд конкретних задач:

1. Виконати функціонально-вартісних аналіз елементів сендвіч-панелі.
2. Обґрунтувати вибір матеріалу-утеплювача сендвіч-панелі за фізико-механічними та теплоізоляційними характеристиками для енергоефективного будівництва.
3. Створити модель сендвіч-панелі та каркасу, в який вона буде встановлюватися.
4. Обрати профілювання та метод кріплення конструкції.
5. Створити 3D-модель конструкції сендвіч-панелі
6. Провести чисельне моделювання теплопровідності конструкції при змінній товщині теплоізоляційного шару з використанням програмного комплексу ANSYS.
7. На основі 3D-моделі конструкції сендвіч-панелі експериментально визначити теплопровідність та порівняти результати із отриманими комп'ютерними розрахунками.
8. Обґрунтувати вибір товщини матеріалу, враховуючи отриманні показники енергоефективності.
9. Провести аналіз якості готового виробу.

2 РОЗДІЛ. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ

2.1 Основні відомості про сендвіч-панелі та проведення ФВА

Сендвіч-панелі виготовляються з трьох шарів (рис. 2.1). Два зовнішні, що виготовлені з металу, полімерів або композитні плити з дерева, надають жорсткості конструкції. Внутрішній шар виконує роль теплоізоляції і найчастіше виготовляється з мінеральної вати, пінополістиролу чи пінополіуретану. Комбінація цих матеріалів дозволяє досягти оптимальних властивостей для різних видів будівель. Компонування різних матеріалів в панелях дозволяє досягти оптимальних характеристик для певного типу будівель.

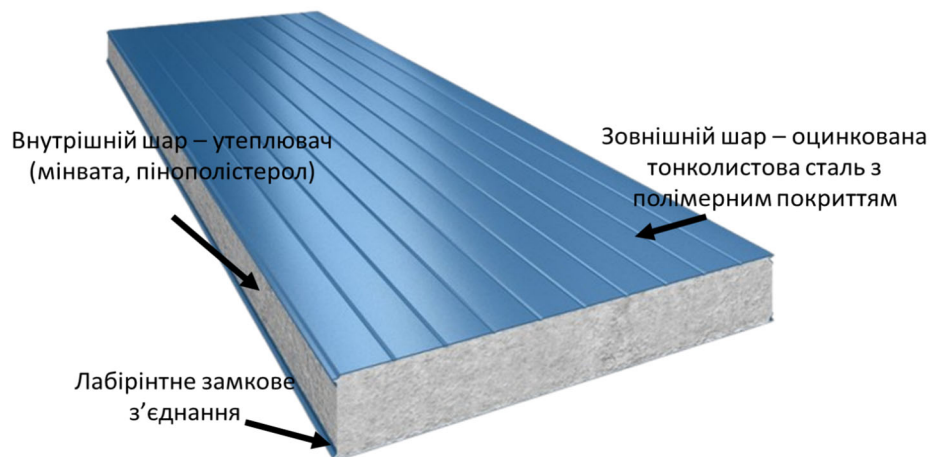


Рисунок 2.1 – Внутрішня складова та елементи з яких складається сендвіч-панель

Завдяки цілісній конструкції сендвіч-панелі поєднують в собі необхідні теплоізоляційні властивості та достатню механічну міцність. Вони здатні витримувати як власну вагу, так і додаткові експлуатаційні навантаження, включаючи вітрові, снігові та інші зовнішні дії, без використання проміжних опор. У випадку монтажу на несучі конструкції, панелі також передають навантаження на каркас будівлі. Тип і характеристики теплоізоляційного

матеріалу, зокрема його товщина та щільність з'єднання з облицюванням, безпосередньо впливають на теплотехнічні властивості готового виробу.

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА) – це системний підхід, який використовується для визначення економічної доцільності, що виконуються продуктом або послугою, з метою зниження загальної вартості без шкоди для якості або ефективності. Цей метод розглядає продукт або послугу не тільки як набір матеріалів або технологій, а в першу чергу як носія певних функцій, що мають цінність для споживача.

Мета ФВА – виявити надмірні витрати, не виправдані виконуваними функціями, і запропонувати шляхи їх усунення або оптимізації. Це дозволяє знизити витрати на виробництво, монтаж, обслуговування або експлуатацію продукції без зниження її корисності, надійності або зручності для користувача. Навпаки, в деяких випадках застосування ФВА може сприяти підвищенню якості за рахунок більш ефективного розподілу ресурсів та оптимізації проєктних рішень.

Основна ідея функціонально-вартісного аналізу полягає у вивченні взаємозв'язку між витратами на реалізацію функцій та рівнем їх важливості. Цей аналіз допомагає виявити резерви для економії коштів і вдосконалення проєктування, технології виробництва або процесу надання послуг. ФВА широко використовується в машинобудуванні, будівництві, енергетиці та інших галузях, де важливо досягти балансу між ефективністю, якістю та вартістю продукту або послуги.

Ключові принципи функціонально-вартісного аналізу включають [13]:

1. Визначення конкретних функцій, які виконує продукт або процес. До них належать як основні функції, що забезпечують головне призначення, так і допоміжні, які підтримують або покращують його роботу.

2. Для кожної функції встановлюється пов'язана з нею вартість. Це може бути вартість матеріалів, енергії, праці, обладнання тощо.

3. Проводиться пошук альтернативних способів виконання функцій з метою зниження витрат без зменшення якості чи ефективності виробництва.

4. Обирається найбільш раціональний варіант, який дозволяє реалізувати функції з мінімальними витратами.

Основними складовими сендвіч-панелі є лист оцинкованої сталі, матеріал-утеплювач, та лист ОСБ. А також пінополіуретановий клей, який застосовується для з'єднання усієї конструкції майбутньої сендвіч-панелі.

Функції кожного елемента конструкції сендвіч-панелі наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Функції елементів конструкції базальтової сендвіч-панелі

Елементи		Функція	
Позначення	Назва	Позначення	Опис
E1	Лист оцинкованої сталі	Ф1	Основний зовнішній елемент конструкції, що виконує функцію жорсткості та захисту. Приймає на себе механічні, кліматичні та атмосферні навантаження.
E2	Матеріал-утеплювач	Ф2	Внутрішній теплоізоляційний елемент конструкції приймає на себе роль утеплювача, підвищує енергоефективність та звукоізоляційні властивості сендвіч-панелі

Продовження таблиці 2.1

Елементи		Функція	
Позначення	Назва	Позначення	Опис
E3	Лист ОСБ	Ф3	Другий зовнішній елемент сендвіч-панелі, що додає конструктивну жорсткість, сприяє зниженню теплопередачі та захищає від механічних пошкоджень з внутрішньої сторони конструкції.
E4	Пінополіуретановий клей	Ф4	Зв'язувальний компонент, що забезпечує надійне з'єднання утеплювача зі сталлю та ОСБ, створюючи єдину монолітну конструкцію.

У результаті функціонального аналізу були визначені основні конструктивні елементи сендвіч-панелі та встановлено ключові функції, які виконує кожен з них. Для подальшого дослідження необхідно провести оцінку параметрів значущості, вартості та ефективності кожного елемента (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Функціонально-вартісний аналіз сендвіч-панелей

Елементи	Функція	Значимість	Вартість	Ефективність
Лист оцинкованої сталі	Ф0	50	30	1,67
Матеріал-утеплювач	Ф1	25	50	0,50
Лист ОСБ	Ф2	15	12	1,25
Пінополіуретановий клей	Ф3	10	8	1,25
Всього		100	100	4,67

Проаналізувавши дані таблиці 2.2, можна зробити висновок, що матеріал-утеплювач має найменшу ефективність – 0,50, але водночас значимістю – 25%. Лист оцинкованої сталі зі значенням ефективності 1,67 та значимості -50%. Тому особливу увагу доцільно приділити вибору матеріалу для утеплювача та конструктивному рішенню саме для цього елемента сендвіч-панелі.

2.2 Побудова 3D-моделі конструкції та модульного каркасу для монтування в них сендвіч-панелей

Головна задача, що вирішується в роботі, полягає у визначенні найбільш ефективного складу сендвіч-панелей шляхом дослідження різних матеріалів для їхнього наповнення та облицювання, з метою покращення експлуатаційних характеристик.

Системи автоматизованого проєктування (CAD) є комплексом програмного забезпечення, призначеного для створення, аналізу та оптимізації інженерних виробів [14]. Вони використовуються для розробки дво- та тривимірних моделей, що дозволяє здійснювати точні розрахунки, виявляти можливі помилки на етапі проєктування та проводити моделювання фізичних процесів.

SolidWorks є потужною CAD-програмою, що використовується для тривимірного моделювання, розробки інженерних конструкцій і проведення

чисельних досліджень у різних галузях промисловості. Вона дозволяє створювати точні геометричні моделі, які слугують основою для конструювання виробів, аналізу їхніх фізико-механічних властивостей і підготовки до виробництва. Програма підтримує параметричне моделювання. Це дає змогу швидко вносити зміни в конструкцію та адаптувати її відповідно до технічних вимог.

SolidWorks було застосовано для створення 3D-моделей і креслень сендвіч-панелей (рис. 2.2), а також модульного каркасу для їхнього встановлення (рис. 2.3). Розробка модульного каркасу (Додаток А) дозволила продемонструвати конструктивні особливості монтажу сендвіч-панелей. Створено спрощену модель (Додаток Б), яка слугує наочним прикладом для перевірки основних параметрів і геометричних характеристик.

Використання SolidWorks забезпечило точне відтворення 3D-моделей і візуалізацію геометрії конструкції, що є необхідним для подальшого аналізу та вдосконалення виробу.

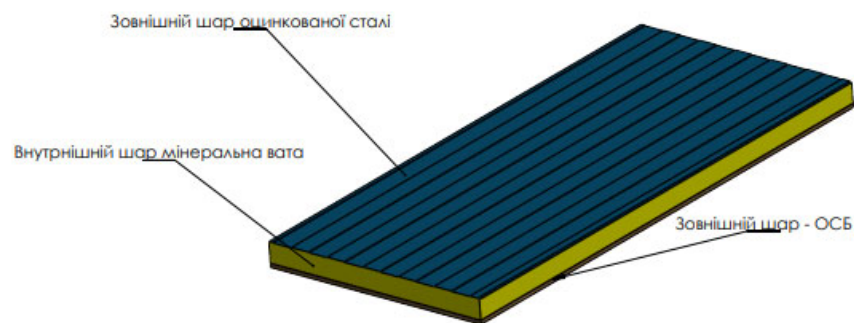


Рисунок 2.2 – 3-D модель креслення сендвіч-панелі та опис матеріалів які використовують для наповнення внутрішнього шару

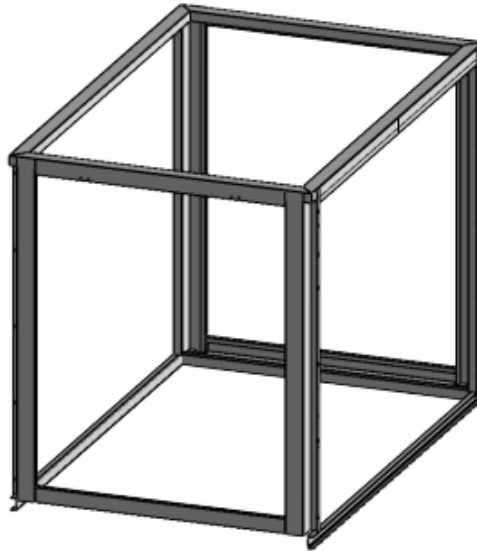


Рисунок 2.3 – 3-D модель модульного каркасу для сендвіч-панелей

Фіксація сендвіч-панелей до модульного каркасу здійснюється за допомогою спеціальних самонарізних гвинтів із термоізоляційними шайбами, які мінімізують термічні містки та запобігають втратам тепла. Додатково використовуються ущільнювачі та герметики на основі полімерних сполук, що підвищують стійкість з'єднання до впливу вологи та атмосферних чинників.

Розташування панелей визначається структурною схемою каркасу, що може бути виконаний із сталевих профілів. У процесі монтажу важливим моментом є забезпечення точного прилягання панелей одна до одної, що досягається використанням замкових з'єднань (рис. 2.4) або прихованих кріплень. Ці методи забезпечують рівномірний розподіл навантажень та зменшують ризик деформацій за умови температурних коливань. Статичні та динамічні навантаження, які діють на панелі, визначають вибір кріпильних елементів та їх розташування. У місцях підвищеного навантаження, таких як стики чи кути будівельної конструкції, застосовуються посилені з'єднання із використанням додаткових опорних профілів.

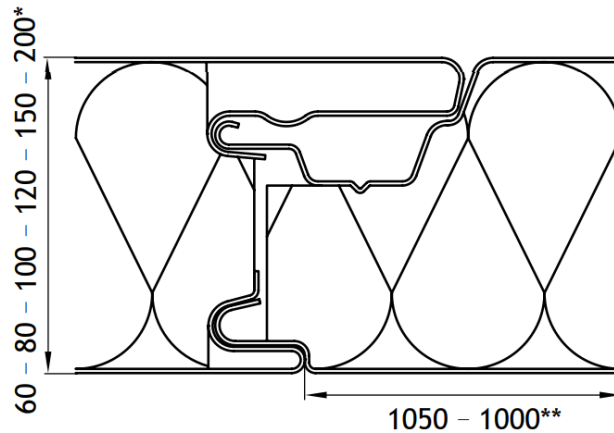


Рисунок 2.4 – Сендвіч-панель із закритим типом замкових з'єднань

Процес монтажу включає етапи підготовки несучої основи, встановлення панелей, тобто каркасу (рис. 2.3), герметизації швів та перевірки герметичності з'єднань. Контроль якості здійснюється шляхом тестування міцності кріплень та оцінки герметичності стиків методом тискових випробувань або термографії. Дотримання технологічних норм забезпечує тривалий експлуатаційний термін конструкції, зберігаючи її теплоізоляційні та механічні характеристики протягом усього експлуатаційного періоду.

Вибір профнастилу є важливим етапом у процесі виробництва сендвіч-панелей, оскільки його характеристики впливають як на технічні, так і на естетичні властивості конструкції. Наявність широкої палітри кольорових рішень, різноманітність варіантів монтажу, а також різні типи профілювання та декоративного оформлення забезпечують можливість використання сендвіч-панелей не лише як конструктивного елемента будівлі, але й як унікальних дизайнерських рішень.

Стінові сендвіч-панелі виготовляються з трьома різними видами профілювання зовнішньої металевої обшивки: мікрохвильовим профілюванням (рис. 2.5, 1), трапецієвидним профілюванням (рис. 2.5, 2) та гладким профілюванням (рис. 2.5, 3).

Мікрохвильове профілювання застосовується для обшивки сендвіч-панелей, виготовлених з тонких сталевих листів, що визначає його доцільність

для швидкого зведення торгових павільйонів, культурно-розважальних центрів та сучасних спортивних комплексів.

Трапецієвидне профілювання передбачає поділ ширини сендвіч-панелі на 36 трапецій (18 випуклих та 18 увігнутих). За такої геометрії ширина кожної трапеції складає 30 мм, а завдяки чітким лініям цей профіль має естетичний вигляд на фасадах будівель як при горизонтальному, так і при вертикальному монтажі.

Гладке профілювання є раціональним для нанесення художніх малюнків, наклеювання декоративних плівок та інших подібних оздоблень. а також застосовувати інші декоративні оздоблення. Такий тип профілювання також сприяє легкості догляду за панелями та збереженню їхнього зовнішнього вигляду.

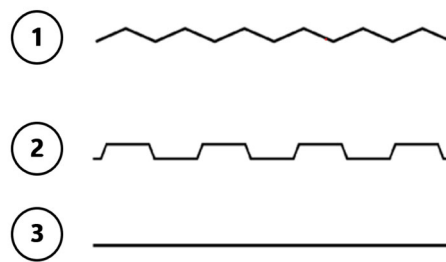


Рис. 2.5 – Види профілювання сендвіч панелей. 1 – мікрохвильове; 2 – трапецієвидне; 3 – гладке (плоске).

Обладнання, яке використовувалося в дослідженні, включає кімнатний термометр для вимірювання температури навколишнього середовища, тепловізор для візуалізації розподілу температури на поверхні зразків, вимірювальну лінійку для контролю геометричних параметрів, а також програмне забезпечення Ansys для чисельного моделювання теплових процесів.

2.3 Розрахунок МКЕ конструкції сендвіч-панелей

Первинний аналіз розподілу температуру по перетину сендвіч-панелей виконаний із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення

ANSYS, що дозволить оцінити теплопровідні характеристики матеріалу перед експериментальними дослідженнями. Ansys є універсальною програмною системою для аналізу методом кінцевих елементів (МКЕ), яка набула своєї популярності протягом останніх 30 років. Вона здобула велику популярність серед фахівців у галузі автоматизованих інженерних розрахунків (CAE) та використовується для вирішення задач МКЕ, як лінійних, так і нелінійних, а також стаціонарних і змінних у часі, зокрема для просторових задач механіки деформованих твердих тіл і механіки конструкцій, включаючи нестационарні геометрично та фізично нелінійні задачі контактної взаємодії матеріалів та елементів конструкцій. Також Ansys забезпечує моделювання просторових процесів у механіці твердих тіл і конструкцій, що деформуються, включаючи геометрично та фізично нелінійні контактні взаємодії. Окрім цього, Ansys застосовується для аналізу механіки рідин і газів, процесів теплопередачі та теплообміну, електродинамічних явищ, акустичних процесів, а також задач механіки зв'язаних полів.

У рамках дослідження за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення необхідно виконати розрахунок теплового потоку через сендвіч-панелі в режимі нестационарного теплового потоку (Transient Thermal). Для цього необхідно визначити та задати відповідні теплофізичні характеристики обраних матеріалів, зокрема коефіцієнти теплопровідності, щільності, а також граничні умови, що враховують реальні експлуатаційні умови конструкції. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність теплоізоляції сендвіч-панелей та підтвердити відповідність матеріалів заданим вимогам.

У розрахунковій моделі Ansys використовується сендвіч-панель із наповнювачем товщиною 100 мм мінеральної вати та зовнішніх шарів зі сталевого листа та дерев'яної панелі (ОСБ).

Температура зовнішнього середовища встановлюється на рівні -20°C , а у внутрішній конструкції – $+20^{\circ}\text{C}$. В бібліотеку Ansys додано властивості мінеральної вати та ОСБ, характеристики сталі взяті з наявної бібліотеки.

Аналіз теплового потоку виконується в динамічному режимі протягом 10 секунд із часовим кроком 1 секунда, що дозволяє отримати детальну картину змін параметрів теплообміну (рис. 2.6). Ліва частина зображення демонструє розподіл температури в моделі, де спостерігається градієнт температури від червоного (вища температура) до зеленого (нижча температура). Права частина відображає розподіл теплового потоку, що має найбільші значення по краях панелі.

З даних видно, що температурний режим ще не стабілізувався, оскільки мінімальна та максимальна температури змінюються з часом. Це свідчить про те, що процес теплообміну триває, і система ще не досягла рівноважного стану.

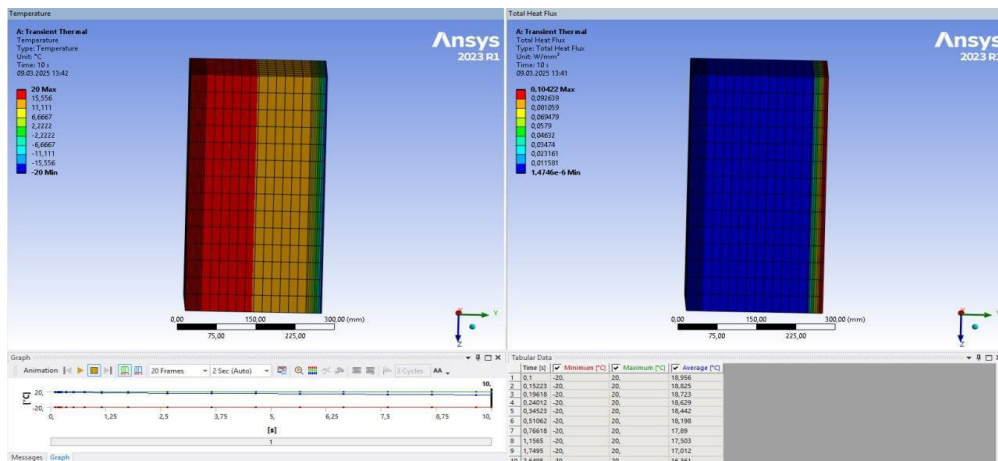


Рисунок 2.6 – Результати аналізу теплового потоку за 10 с із кроком в 1 с.

Для подальшого аналізу розподілу температури час розрахунку було збільшено з 10 до 600 секунд із кроком 100 секунд, що дозволило отримати відповідні результати (рис. 2.7). Розподіл температури демонструє поступове поширення тепла через модель від зон нагріву до менш прогрітих областей. Градієнтовий перехід кольорів від червоного та жовтого до синього та зеленого свідчить про стабільний процес теплообміну. Розподіл теплового потоку є майже однорідним, що вказує на вирівнювання температурних градієнтів і поступове сповільнення процесу теплообміну. Значення потоку

($6,71 \times 10^{-6}$) свідчить про наближення системи до термодинамічної рівноваги. Хоча теплопередача ще не завершена, процес поступово стабілізується.

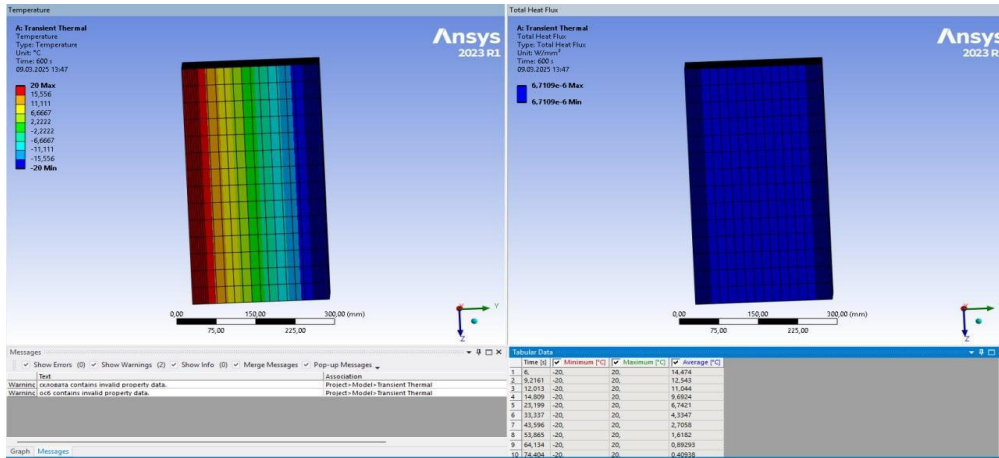


Рисунок 2.7 – Результати аналізу теплового потоку за 600 с із кроком в 100 с.

Подальші розрахунки на довший проміжок часу дозволять визначити момент досягнення стаціонарного стану, коли температура в усіх точках стане майже однаковою, тому з цією метою час дослідження було продовжено до 7200 секунд із кроком 700 секунд (рис. 2.8). Отримані результати свідчать про завершення основного процесу теплообміну.

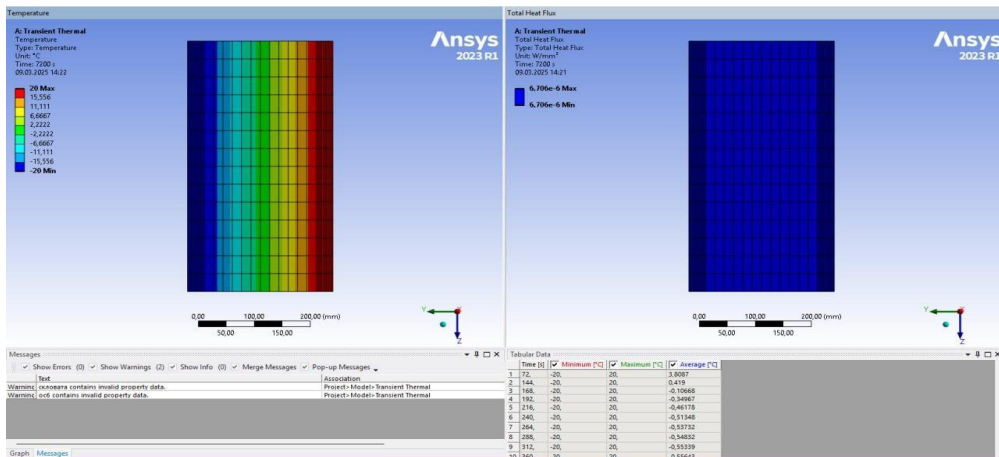


Рисунок 2.8 – Результати аналізу теплового потоку за 7200 с із кроком в 700 с.

2.4 Висновки до розділу 2

В результаті проведеного функціонального аналізу встановлено, що кожен елемент сендвіч-панелі виконує окрему функцію, яка впливає на експлуатаційні характеристики виробу. ФВА показав, що найбільшу ефективність забезпечує теплоізоляційний шар, оскільки він має найвищу значущість у загальній функціональній структурі панелі, що вимагає особливого підходу до вибору матеріалу-утеплювача. Застосування оцинкованого сталевого листа та ОСБ як зовнішніх шарів конструкції забезпечує жорсткість і захист від фізико-механічних впливів, а пінополіуретановий клей створює міцність та довговічність виробу.

Проведене моделювання із застосуванням САД-систем, а саме програмного продукту SolidWorks, дозволило створити 3D-моделі сендвіч-панелей та модульного каркасу. Візуалізація конструкції та її складових сприяла ефективному аналізу особливостей монтажу, вибору способів кріплення і визначенню потенційних зон зосередження навантажень. Розробка геометрично різних типів профілювання облицювального шару дає змогу не лише адаптувати панелі до різних умов експлуатації, а й урізноманітнити дизайнерські рішення фасадів будівель.

Чисельне моделювання МКЕ сендвіч-панелей у програмному середовищі Ansys підтвердило доцільність використання базальтової мінеральної вати як доцільного утеплювача. Отримані результати аналізу розподілу температури та теплового потоку у часі, вказують на ефективність теплоізоляційного шару. Поступове досягнення термодинамічної рівноваги в моделі підтвердило стабільність фізико-механічних та теплоізоляційних характеристик обраного матеріалу.

Дослідження дозволило сформулювати комплексне уявлення про функціональну структуру сендвіч-панелі, визначити вплив матеріалів на її енергоефективність та встановити обґрунтовані підходи до конструктивного проектування з урахуванням експлуатаційних вимог.

3 РОЗДІЛ. ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Обґрунтування вибору матеріалів для сендвіч-панелі

У процесі розроблення конструкції сендвіч-панелей особливу увагу було приділено вибору матеріалів, які забезпечують поєднання високих теплоізоляційних властивостей, механічної міцності, стійкості до впливу навколишнього середовища і довговічності.

Зважаючи на умови експлуатації сендвіч-панелей, що передбачають вплив температурних коливань, вологи та механічних навантажень. Серед основних характеристик, яким мають відповідати обрані компоненти конструкції, є низька теплопровідність, вогнестійкість, стійкість до вологи та біологічних впливів, технологічність обробки, та можливість подальшої безпечної утилізації.

Для аналізу будуть розглядатися стінові сендвіч-панелі, в яких використовуються різні наповнювачі утеплювачі.

Розібравши основні види матеріалів які використовують в галузі енергоефективного будівництва можна призначити раціональний за такими механічними характеристиками як міцність, теплоізоляція, вологостійкість, звукоізоляція, стійкості до вологи та пари, а також здібністю самостійно затухати. Основні матеріали-наповнювачі, та їх технічна характеристика наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика основних матеріалів які використовуються у внутрішніх наповнювачах сендвіч-панелей

Характеристика мат-лу	Матеріали			
	Базальтова мінвата 100 мм	Пінополістирол 100 мм	Пінополіуретан 100 мм	Пінополіізоціанура т 100 мм
Щільність, кг/м ³	110-120	25	42 (±2%)	40
Теплопровідність (λ), Вт/(м·К)	0,035-0,045	0,03-0,043	0,019-0,035	0,039 - 0,042
Межа вогнестійкості	E150/190	E15	EI 15/EI 15	EN 13501-1
Водопоглинання (повне занурення у воду), %	2	0,4	2	1-2
Звукоізоляція, дБ	35	23	21	52-60

Згідно з проведеним аналізом матеріалів, що застосовуються у будівництві, базальтова мінеральна вата є одним з найбільш енергоефективних матеріалів для вирішення поставленої задачі. Це обумовлено її звукоізоляційними властивостями та теплопровідністю, що може досягати 0,045 Вт/(м·К). Матеріал відповідає вимогам пожежної безпеки, належачи до класу негорючих (НГ), і має стійкість до займання при температурах до 1500 °С. У порівнянні з пінополіізоціануратом, який має подібні або в окремих випадках гірші фізико-механічні характеристики, мінеральна вата відрізняється нижчою собівартістю, що зумовлює її ефективність як наповнювач для сендвіч-панелей.

Основним теплоізоляційним шаром панелі обрано мінеральну вату, яка, завдяки низькому коефіцієнту теплопровідності (0,035–0,045 Вт/м·К), ефективно зменшує тепловтрати крізь конструкцію. Її волокниста структура забезпечує не лише збереження тепла, а й додаткову звукоізоляцію (до 35 дБ), що є важливою перевагою при використанні панелей у житлових та промислових спорудах.

Висока вогнестійкість мінеральної вати, яка дозволяє витримувати температури до 1000–1200 °С без втрати функціональних властивостей, підвищує рівень пожежної безпеки конструкцій. Крім того, матеріал характеризується біологічною інертністю, стійкістю до грибків та мікроорганізмів, а також не піддається деформаціям у процесі тривалої експлуатації за умови правильної гідроізоляції.

У процесі виробництва мінеральної вати частина сировинних відходів, що зберігають придатність до використання, повертається в технологічний цикл для повторної переробки. Виробничі залишки, які не підлягають повторному використанню, а також відходи пакувальних матеріалів підлягають утилізації, знищенню або застосуванню в альтернативних технологічних процесах.

Хімічний склад базальтової мінеральної вати наведено в таблиці 3.2. Основною сировиною для її виготовлення є природні гірські породи вулканічного походження, переважно базальт. Згідно з технічними умовами провідних європейських виробників теплоізоляційних матеріалів, а також відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-318:2016.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад базальтової мішкати

SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	FeO	Na₂O	K₂O
40%	14...18%	12...16%	6...9%	6...9%	2...4%	1...3%

3.2 Технологічний процес виготовлення сендвіч-панелей

Процес виробництва сендвіч-панелей відбувається на автоматизованій лінії, яка забезпечує безперервне виробництво сталевих та ізоляційних виробів. На початковому етапі у виробничу лінію встановлюються два сталевих рулони – один зверху і один знизу (рис. 3.1). Це можуть бути рулони з оцинкованої, алюмінієвої або оцинкованої сталі з полімерним покриттям. Сталь подається на виробничу лінію в рулонах, що дозволяє відразу профілювати її без необхідності попереднього розкрою на листи.



Рисунок 3.1 – Вузол для розмотування сталевих рулонів, обладнаний двома барабанами.

Одночасно з подачею металу автоматично подається утеплювач – зазвичай мінеральна вата, пінополістирол або пінополіуретан. За допомогою спеціальних штовхачів утеплювач рівномірно розподіляється по всій ширині майбутньої сендвіч-панелі. Зверху і знизу на сталеву поверхню наноситься пінополіуретановий клей (рис. 3.2), який відразу ж рівномірно розпилюється за допомогою особистого розпилювачу, встановленого в конструкції верстата.

Далі починається процес профілювання сталевих рулонів, під час якого матеріал набуває необхідної жорсткості та форми. На цій технологічній операції ізоляція щільно притискається до обох металевих поверхонь і з'єднується з ними в єдину конструкцію.



Рисунок 3.2 – Технологічний процес нанесення пінополіуретанового клею на майбутню сендвіч-панель

Отриманий теплоізоляційний шар для сендвіч-панелі проходить через автоматичний прес (рис. 3.3) , де високий тиск і температура запускають полімеризацію клею – хімічну реакцію, яка з'єднує всі компоненти панелі в єдине ціле. Після цього панель транспортується вздовж виробничої лінії ще на п'ять метрів для стабілізації та завершення початкового етапу затвердіння.

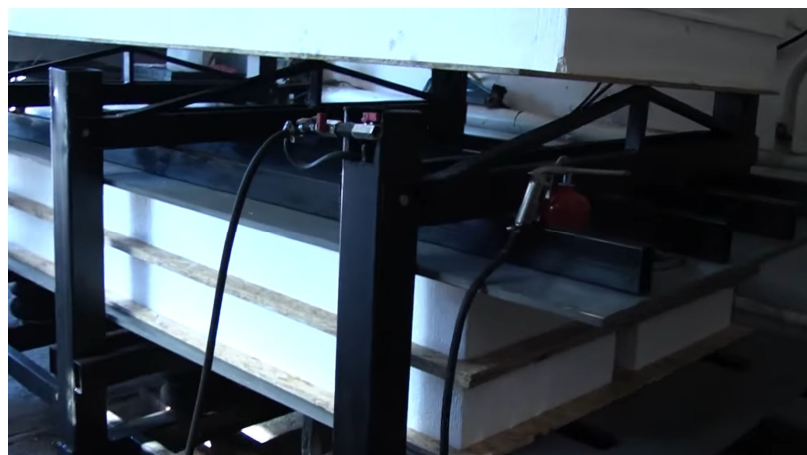


Рисунок 3.3 – Технологічний процес автоматичного пресування сендвіч-панелі після основної технологічної операції

У виробничому процесі задіяні сучасні автоматизовані верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), а також датчики контролю, які стежать за рівномірністю нанесення клею, температурою і тиском преса. Людська праця використовується переважно на етапах підготовки сировини, встановлення валів, контролю якості продукції та обслуговування лінії.

Сировина у вигляді рулонної сталі та утеплювача в процесі виробництва проходить складну механічну, термічну та хімічну обробку: механічне профілювання, термічне пресування (рис. 3.4) та хімічну реакцію полімеризації клею. В результаті утворюється готовий виріб – сендвіч-панель з високими теплоізоляційними характеристиками, міцністю і довговічністю.



Рисунок 3.4 – Технологічний процес пресування з матеріалом-утеплювачем мінеральної вати

Панелі легко монтуються, не потребують спеціального обладнання для монтажу, можуть бути демонтовані та використані повторно. Транспортуються в горизонтальному положенні в штабелях, захищені від вологи та механічних пошкоджень. Допускається зберігання на відкритому майданчику за умови накриття вологостійкою плівкою. Обслуговування панелей зводиться до візуального огляду і локального ремонту пошкоджених ділянок металевого покриття або ізоляції, а також, при необхідності, заміни панелі в модульній конструкції.

З ергономічної точки зору сендвіч-панелі є зручними в транспортуванні та монтажу. У процесі експлуатації вони не потребують спеціального догляду, що спрощує обслуговування. Поверхня панелі може бути адаптована під декоративні або практичні потреби користувача, що забезпечує комфорт при використанні у системі «людина-виріб-середовище».

3.3 Роль модуля кислотності та вмісту неволокнистих включень у виробництві мінеральної вати

З метою оцінки якісного складу мінеральної сировини, що використовується у виробництві базальтової мінеральної вати, застосовується показник модуля кислотності (M_k) а також вміст неволокнистих включень. Перший модуль характеризує співвідношення між вмістом кислотних і основних оксидів у сировині та має безпосередній вплив на терmostійкість, волокноутворювальну здатність і стабільність готового матеріалу. Розрахунок модуля кислотності здійснюється за формулою:

$$M_k = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO},$$

Де: в чисельнику - сумарний вміст оксидів кремнію і алюмінію у відсотках за масою;

у знаменнику – сумарний вміст оксидів кальцію і магнію у відсотках за масою.

Підставляючи значення з хімічного складу, отримаємо:

$$M_k = \frac{40 + 16}{13 + 6} = \frac{56}{19} \approx 2,95$$

Значення модуля кислотності в межах 2,5–3,5 є оптимальним для забезпечення ефективного волокноутворення в процесі виробництва мінеральної вати. Високий M_k сприяє підвищенню хімічної та термічної

стійкості волокон, що позитивно позначається на експлуатаційних властивостях теплоізоляційного шару сендвіч-панелі.

Крім значення модуля кислотності, важливим етапом контролю якості мінеральної вати є визначення вмісту неволокнистих включень, що впливають на однорідність структури, волокноутворення та експлуатаційні характеристики матеріалу. Методика передбачає подрібнення проби мінеральної вати в спеціалізованому пристрої, зображеному на рисунку 3.5, з подальшим просіванням подрібненої маси через сито встановленого калібру. Отримані залишки дозволяють кількісно оцінити вміст твердих включень, не здатних до формування волокон. Надлишок таких частинок свідчить про порушення температурного режиму плавлення або про надлишок сторонніх домішок у сировині, що вимагає коригування технологічного процесу.

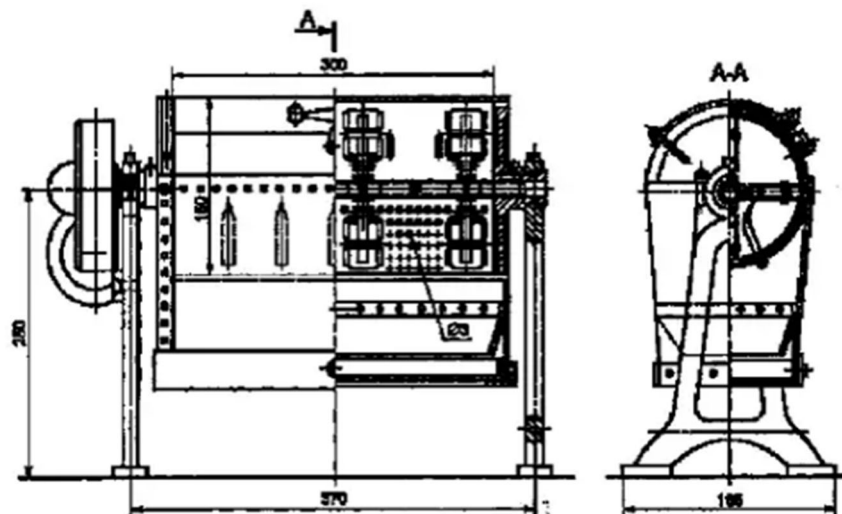


Рисунок 3.5 – Пристрій для визначення вмісту неволокнистих включень у мінеральній ваті

Окрему увагу у виборі матеріалів було приділено питанням екологічності та можливості утилізації. Важливою перевагою мінеральної вати є її придатність до вторинної переробки. Після закінчення експлуатаційного циклу конструкцій, мінеральну вату можна піддавати подрібненню в спеціалізованих установках, де матеріал очищується від домішок та готується до повторного використання. Оброблені частинки надалі

застосовуються як мінеральні наповнювачі або добавки у виробництві будівельних матеріалів. Зокрема, вони використовуються при виготовленні дорожніх покриттів та цегли, де змішуються з іншими сировинними компонентами, що дозволяє зменшити споживання первинних природних ресурсів і знизити загальний екологічний слід виробництва.

Зовнішній шар конструкції виготовляється зі сталевого листа з гладким профілюванням, що забезпечує необхідну жорсткість, захист від механічних пошкоджень і тривалий термін служби. Сталевий лист із полімерним покриттям додатково протистоїть впливу атмосферних чинників, зокрема корозії, ультрафіолету та вологи, що зменшує витрати на технічне обслуговування протягом експлуатаційного циклу.

Для внутрішнього шару панелі застосовується композитна плита (ОСБ), яка виконує функцію підсилення конструктивної жорсткості. Завдяки своїм механічним характеристикам ОСБ підвищує міцність панелі до локальних ударних навантажень, а також сприяє додатковому теплоізоляційному ефекту. Матеріал легко піддається механічній обробці, що забезпечує зручність у виробництві та монтажі.

Для покращення експлуатаційних властивостей сталі, що використовується як зовнішній шар сендвіч-панелі, доцільним є її оцинкування, яке забезпечує ефективний захист від корозії при тривалому впливі атмосферних чинників. Така обробка дозволяє значно підвищити довговічність сталевого листа, зберегти геометричну стабільність профілю та зменшити потребу в додатковому антикорозійному захисті під час експлуатації конструкції в умовах підвищеної вологості або температурних коливань. Для ОСБ, що використовується як внутрішній конструктивний шар сендвіч-панелі, доцільним є її оброблення захисними просоченнями, зокрема водовідштовхувальними та біозахисними складами. Такі заходи підвищують вологостійкість плити, зменшують ризик деформацій під дією змін температурно-вологісного режиму та забезпечують додаткову стійкість до грибкових уражень і шкідників. Захисна обробка ОСБ сприяє збереженню

геометричної стабільності елемента протягом усього терміну експлуатації конструкції. Проте це може бути економічно не доцільно в умовах якщо в умовах, коли конструкція сендвіч-панелі експлуатується в закритому сухому середовищі з контрольованим мікрокліматом, де вплив вологи та біологічних факторів є мінімальним. У таких випадках застосування додаткових просочень не дає істотного приросту довговічності матеріалу, але призводить до необґрунтованого підвищення вартості виробу.

3.4 Висновки до розділу 3

В ході обґрунтування вибору матеріалів для конструкції сендвіч-панелі було встановлено, що найбільш раціональним рішенням для теплоізоляційного шару є застосування базальтової мінеральної вати. Її перевага полягає у поєднанні низької теплопровідності, високої звукоізоляції, відмінної вогнестійкості. На основі аналізу фізико-хімічних характеристик матеріалів, що включали параметри щільності, водопоглинання, межу вогнестійкості та звукоізоляційні властивості, було зроблено висновок, що базальтова мінеральна вата забезпечує найкраще співвідношення ефективності, вартості та екологічної безпечності. Особливу увагу було приділено уточненню таких характеристик, як щільність матеріалу, що визначає загальну вагу та механічну жорсткість конструкції, а також водопоглинання, яке впливає на стабільність теплоізоляційних властивостей в умовах підвищеної вологості. Розбіг значень водопоглинання для мінеральної вати пояснюється різницею в технологіях виробництва та рівнем гідрофобної обробки.

Технологічний процес виготовлення сендвіч-панелей реалізується на автоматизованій виробничій лінії, що дозволяє досягти високої точності та якості готової продукції. Весь цикл виробництва включає механічне профілювання сталевих облицювань, нанесення пінополіуретанового клею, встановлення матеріала-утеплювача, полімеризацію та пресування з формуванням сендвіч-панелі. Сучасні засоби автоматизації дозволяють

забезпечити контроль параметрів процесу та своєчасне виявлення відхилень, що мінімізує виробничі втрати та забезпечує стабільну якість виробу.

Аналіз модуля кислотності та вмісту неволокнистих включень у базальтовій мінеральній ваті демонструє відповідність сировини оптимальним показникам для формування однорідної волокнистої структури. Високе значення модуля кислотності (близько 2,95) підтверджує ефективність хімічного складу базальтової сировини для забезпечення термічної стійкості, волокноутворення та експлуатаційної надійності утеплювача. Контроль неволокнистих включень є важливою умовою підтримання стабільних властивостей мінеральної вати.

Додаткові конструктивні елементи, сталевий лист і плита ОСБ, також мають важливе значення у забезпеченні міцності та стійкості сендвіч-панелі. Зовнішній шар із оцинкованої сталі з полімерним покриттям забезпечує довготривалий захист від впливу навколишнього середовища, а внутрішній шар з ОСБ виконує функцію додаткового кріплення та термічної ізоляції. Захисна обробка для сталі антикорозійна, яка доцільна в умовах підвищеної вологості, однак у сухому внутрішньому середовищі може бути оптимізована для зниження вартості виробу.

Матеріали, обрані для виготовлення сендвіч-панелей, є технічно, економічно та енергоефективно доцільними. Вони забезпечують необхідний баланс між теплоізоляційними, фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, що підтверджує обґрунтованість запропонованих технічних рішень у межах досліджуваного інженерно-технологічного процесу.

4 РОЗДІЛ. ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Аналіз дефектів під час виробництва сендвіч-панелей

В процесі виробництва сендвіч-панелей можуть виникати різноманітні дефекти, які суттєво впливають на експлуатаційні характеристики готових виробів. Аналіз цих дефектів є важливим етапом для забезпечення високої якості продукції та оптимізації виробничих процесів.

Під час виробництва сендвіч-панелей використовується клей на основі поліуретану, який може бути як однокомпонентним, так і двокомпонентним. Перший варіант частіше застосовується під час ручного складання, тоді як другий значно спрощує механізований процес і скорочує час, необхідний для схоплювання. Для забезпечення високої якості виготовлення необхідно ретельно контролювати тривалість схоплювання однокомпонентного клею. Важливу роль відіграє контроль за витратою клею, оскільки забивання сопел клеє-розподільного обладнання може призвести до невідповідності між показаннями витрат і фактично нанесеною кількістю. Брак клею може стати причиною відокремлення зовнішнього шару від матеріалу-утеплювачу, що, своєю чергою, призведе до руйнування конструкції під час експлуатації. Крім того, використання матеріалів із неналежним ґрунтовим покриттям може спричинити відшарування обшивок і погіршення якості сендвіч-панелей.

Мінвата сендвіч-панелей, складається з замкових з'єднань (рис 4.1), які формуються шляхом розрізання листа. Замкове з'єднання мають бути орієнтовані вертикально для забезпечення необхідної міцності стиснення сталюого листу профілювання. Використання мінвати із неправильно розташованими волокнами призводить до утворення дефектів. Технічні нормативні документи регулюють відхилення висоти замкового з'єднання, яке не повинно перевищувати 1,0 мм (відповідно до норм Польщі – 0,5 мм). Перевищення цієї межі може перешкодити правильній взаємодії зовнішнього та внутрішнього шару сендвіч-панелі.

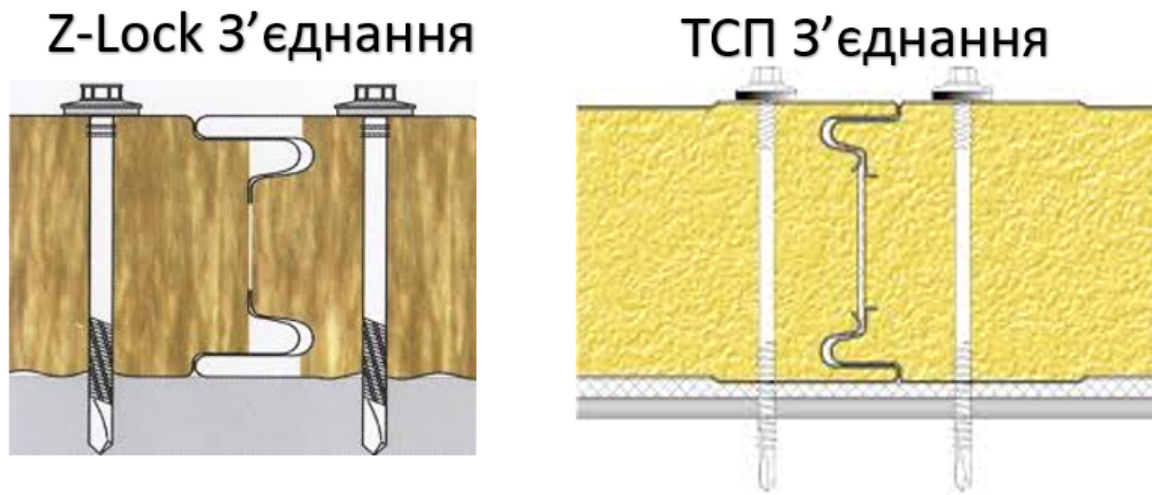


Рисунок 4.1 – Приклади замкового з'єднання сендвіч-панелей

Критично важливим аспектом є врахування температурно-вологісного режиму у процесі склеювання: ефективно з'єднання сталю листу і мінвати можливе тільки за позитивних температур, оскільки підвищена температура прискорює процес склеювання.

Механічні пошкодження і корозія сталю листу можуть виникати через неправильний вибір марок сталі та їхніх характеристик для виробництва. Наприклад, якщо товщина металу становить менше ніж 0,45 мм, використання такого матеріалу недоцільно, оскільки це призводить до погіршення якості прокату і недостатньої міцності на стиск.

Щільність замкового з'єднання і їхнє положення відіграють важливу роль у забезпеченні необхідних несучих характеристик і теплотехнічних властивостей.

Якість профілювання замкового з'єднання сендвіч-панелей також має значення. Конструкція цього з'єднання має унеможливити проникнення вологи в сердечник і запобігати капілярному ефекту. Інакше волога, що потрапляє всередину, може призвести до пошкодження теплоізоляційного шару.

Неправильна геометрія панелей, зокрема відхилення від стандартів різів і розмірів, може призвести до утворення щілин.

4.2 Умови експлуатації сендвіч-панелей

Експлуатаційна надійність сендвіч-панелей визначається сукупністю чинників, що включають кліматичні умови, характер механічних навантажень, вологісне середовище, рівень ультрафіолетового випромінювання, а також корозійну активність атмосфери. З огляду на те, що сендвіч-панелі часто використовуються як зовнішні огорожувальні конструкції, їхня працездатність протягом тривалого часу значною мірою залежить від здатності зберігати теплоізоляційні, звукоізоляційні та механічні характеристики в умовах змінного зовнішнього впливу.

Серед основних кліматичних чинників, які впливають на сендвіч-панелі, слід виділити різкі коливання температури, дію прямих сонячних променів, високу вологість або, навпаки, надмірну сухість повітря. Сендвіч-панелі можуть ефективно експлуатуватися за зовнішніх температур від $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в середині приміщень — у межах від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$, за умови, що рівень відносної вологості повітря в середині не перевищує 60% (рис. 4.2).

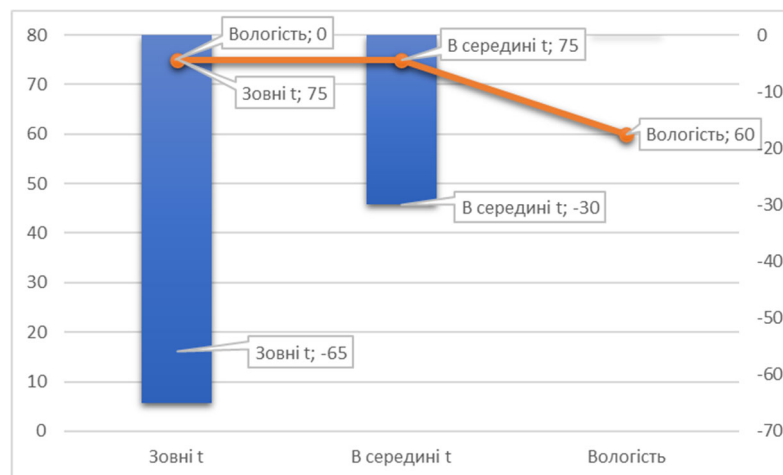


Рисунок 4.2 – Діаграма температурного і вологісного діапазону експлуатації

За таких умов відбувається температурне розширення і стиснення матеріалів, що вимагає високої еластичності клею, герметиків і стійкості до утворення мікротріщин у шарах панелі. Тому під час проектування необхідно

передбачити температурні шви, компенсатори деформацій, а також ретельно підібрати теплоізоляційний матеріал із високою стабільністю властивостей.

Особливу увагу слід приділяти умовам підвищеної вологості, які можуть призвести до зниження теплоізоляційної здатності панелі через накопичення конденсату або капілярне вбирання вологи у структуру матеріалу. Варто зазначити, що згідно з даними таблиці 3.1 з третього розділу, показники водопоглинання для мінеральної вати та пінополістиролу мають подібні значення, однак мінеральна вата демонструє дещо кращі характеристики за цим параметром, що підвищує її придатність для використання в умовах підвищеної вологості. Для уникнення таких явищ важливим є герметичне виконання стиків панелей та використання матеріалів з низькою гігроскопічністю. Наприклад, при використанні мінеральної вати необхідне додаткове вологозахисне покриття або плівка, що запобігає контакту з водяною парою, що підвищить її водопоглинаючі характеристики.

У випадках, коли сендвіч-панелі застосовуються в агресивному середовищі, зокрема на підприємствах хімічної промисловості, в прибережних зонах або на транспортних вузлах, підвищується ймовірність корозійного пошкодження металевих елементів. У таких ситуаціях доцільним є використання оцинкованих або алюмо-цинкових сталей з додатковими полімерними покриттями, які значно підвищують стійкість до дії кислот, і солей.

Механічні навантаження, такі як вітрове навантаження, удари або навантаження від снігу, чинять додатковий вплив на з'єднання панелей з несучим каркасом. Це обумовлює необхідність у надійних кріпильних елементах і правильному монтажі, з урахуванням можливих деформацій. Умови експлуатації також мають враховувати вплив ультрафіолету, який з часом може призводити до старіння зовнішнього полімерного шару. З цією метою рекомендовано використовувати УФ-стійкі покриття, які запобігають вицвітанням і втраті захисних властивостей.

За результатами моделювання в Ansys було виявлено, що процес теплообміну поступово стабілізується із часом, а система наближається до термодинамічної рівноваги за умови тривалого впливу температурних градієнтів.

Після отримання результатів аналізу в Ansys, проведені експериментальні дослідження параметру теплового потоку. У процесі дослідження для експериментальних зразків застосовувалися ті самі матеріали та параметри, що й у програмному моделюванні, але взята різна товщина мінеральної вати.

Для аналізу теплопровідності сендвіч-панелей взято два зразки, що дозволить провести порівняльне дослідження їхніх основних характеристик. В обох випадках зовнішній шар – сталевий гладкий лист товщиною 1 мм. Для першого зразка взята базальтова мінеральна вата товщиною 100 мм. Для другого зразка використовувалася базальтова мінеральна вата товщиною 50 мм з додатковим захисним тепло-відражаючим шаром з підпокрівельної фольги товщиною 1 мм. У якості другого зовнішнього шару, який буде закривати конструкцію, обрана композитна плита з дерева (ОСБ) товщиною 11 мм (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Матеріали для створення експериментальних зразків

На початковому етапі експерименту було зафіксовано термометром температуру в морозильній камері, яка становила -20°C . Після цього у камеру було поміщено зразок 1 та зразок 2. Для контролю температурних параметрів один термометр було розміщено всередині морозильної камери для реєстрації

температури зовнішнього середовища, а інший в середині умовної споруди для вимірювання внутрішньої температури (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Встановлення експериментальних зразків в морозильну камеру: ліворуч – зразок 1 (мінвата 100 мм); праворуч - зразок 2 (мінвата 50 мм з підпокрівельною фольгою)

Для реєстрації тепловтрат досліджуваних зразків було встановлено тепловізор Lahoux Spotter T25 (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Тепловізор Lahoux Spotter T25

Після налаштування обладнання фіксувалась візуалізація тепловтрат досліджуваних зразків протягом 3 годин (рис. 4.6), а всі отримані результати були занесені до таблиці 4.1.

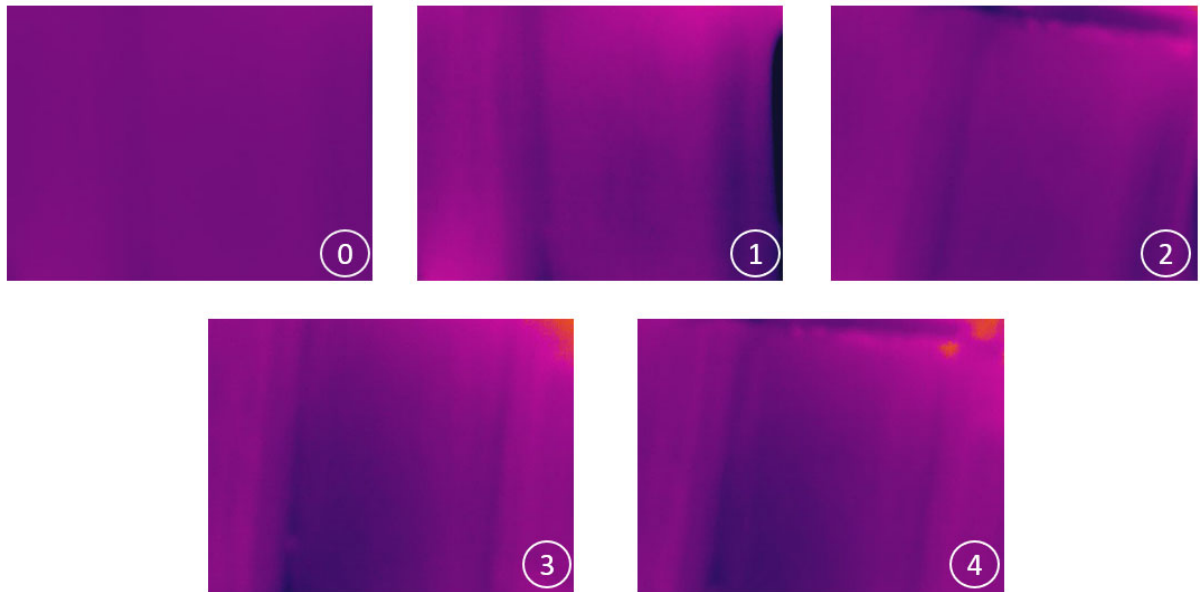


Рисунок 4.6 – Фотознімки температури сендвіч панелей за допомогою тепловізора (0 – початковий стан; 1 – стан через годину; 2 – стан через 1,5 год; 3 – стан через 2 години; 4 – стан через 3 години)

Таблиця 4.1 – Співвідношення часу та температури конструкції

Час, t, год	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	
T, °C	Зразок 1	22	19,5	17,4	17	16,5	16	15,7
	Зразок 2	22	21	19,3	19,1	18,7	18	17,8

На основі отриманих даних було побудовано графік змін температури (рис. 4.7).

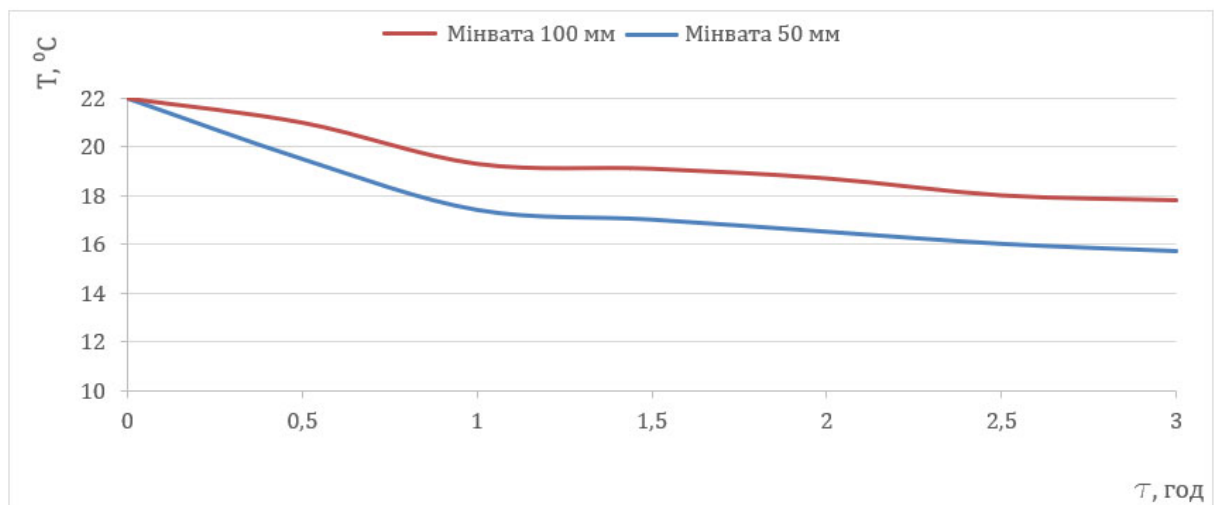


Рисунок 4.7 – Графік динаміки спаду температури

Експериментальні дослідження підтвердили, що панелі з товстішим шаром мінеральної вати (100 мм) забезпечують кращу теплоізоляцію порівняно з панелями, які мають лише 50 мм утеплювача з додатковим шаром фольги. Динаміка спаду температури свідчить про повільніше охолодження першого зразка, що вказує на його вищу енергоефективність. Водночас, наявність тепловідбивного шару фольги у другому зразку дещо компенсувала зменшену товщину утеплювача, зменшуючи тепловтрати шляхом відбиття інфрачервоного випромінювання назад у внутрішній простір. Однак, цього ефекту виявилось недостатньо для досягнення теплоізоляційних характеристик, подібних до зразка з товстішим шаром мінеральної вати.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про доцільність використання панелей з більшою товщиною ізоляційного шару для забезпечення кращої термоізоляції у конструкціях, що експлуатуються в умовах значних температурних перепадів, тоді як додавання фольги може слугувати додатковим засобом зниження тепловтрат.

4.3 Утилізація та способи переробки матеріалів сендвіч-панелей

По завершенні експлуатаційного терміну сендвіч-панелі підлягають демонтажу та подальшій утилізації. Через складову багат шарову структуру, що включає облицювання (переважно зі сталі з полімерним покриттям) та теплоізоляційний наповнювач (пінополістирол, мінеральна вата, ППР тощо), процес утилізації потребує спеціального підходу з фасуванням матеріалів.

Найбільш екологічно безпечним із сучасних утеплювачів вважається мінеральна вата. Після демонтажу конструкцій її можна подрібнити в спеціалізованих установках, очистити від сторонніх домішок і повторно використати як мінеральний наповнювач у виробництві будівельних матеріалів, зокрема, цегли, неструктурного бетону, теплоізоляційної засипки або основ для дорожнього будівництва. Таким методом, вдається не тільки скоротити кількість відходів, а й частково замінити первинну сировину, що відповідає принципам циркулярної економіки.

Мінеральна вата має високу термічну стабільність і не піддається біологічному розкладанню, тому її утилізація не становить екологічної загрози у випадку правильного поводження.

Утилізація мінеральної вати також можлива шляхом захоронення на спеціалізованих полігонах твердих будівельних відходів. При цьому важливо забезпечити попереднє ущільнення матеріалу, оскільки його волокниста структура створює значні об'єми, що ускладнює транспортування та зберігання. У європейській практиці дедалі більше впроваджуються методи термічної переробки мінераловатних відходів, зокрема спільне спалювання з утилізаційною метою на цементних заводах, де отримана енергія використовується у виробничому процесі.

У контексті стійкого розвитку особливого значення набуває створення замкнених технологічних циклів, в яких мінеральна вата після використання може повертатися у виробництво у вигляді вторинної сировини. Це дозволяє не лише скоротити кількість відходів, але й зменшити витрати на добування первинних мінеральних ресурсів, знизити навантаження на екосистему та відповідати європейським стандартам екологічного управління будівельними матеріалами.

4.4 Висновки до розділу 4

Аналіз експлуатаційних характеристик та дефектів сендвіч-панелей дозволив встановити ключові фактори, що впливають на якість, довговічність та функціональність конструкцій. Виявлено, що основні виробничі дефекти, такі як недостатнє склеювання шарів, неправильне профілювання, пошкодження зовнішніх оболонок, а також неточності у геометрії елементів, безпосередньо знижують технічні характеристики панелі. Особливу увагу необхідно приділяти правильному вибору матеріалів-утеплювачів, точному дотриманню технологічних параметрів процесу склеювання, а також контролю температурно-вологісного режиму на виробничих ділянках.

Результати аналізу умов експлуатації сендвіч-панелей свідчать, що зовнішні фактори, зокрема температура, вологість, ультрафіолетове випромінювання та фізико-механічні навантаження, суттєво впливають на технічні параметри виробу. Ефективність теплоізоляції залежить не лише від властивостей використовуваного матеріалу-утеплювачу, а й від правильного кріплення під час монтажу, герметичності стиків і вибору відповідних покриттів для зовнішнього шару.

Порівняння двох експериментальних зразків сендвіч-панелей, один із яких містив шар базальтової мінеральної вати товщиною 100 мм, а інший — шар мінеральної вати товщиною 50 мм із додатковим тепловідбивним покриттям із фольги, показало, що збільшення товщини мінеральної вати є ключовим фактором для підвищення теплоізоляційних властивостей панелі. Наявність тепловідбивного шару з фольги у другому зразку дещо знизила втрати тепла за рахунок відбиття інфрачервоного випромінювання, проте цей ефект виявився недостатнім для компенсації зменшення товщини.

Утилізація мінеральної вати зі сендвіч-панелей є важливою складовою екологічно відповідального будівництва та ресурсоефективного поводження з відходами. Завдяки можливості вторинного використання та безпечного захоронення, мінеральна вата демонструє високий потенціал для інтеграції в циркулярну економіку. Створення замкнених технологічних циклів дозволяє не лише зменшити обсяг будівельних відходів, але й сприяє зниженню екологічного навантаження та економії природних ресурсів

Базальтова мінеральна вата забезпечує не лише високі технічні характеристики, але й відповідає сучасним вимогам сталого розвитку в будівельній галузі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження сендвіч-панелей виконано теоретичний аналіз, чисельне моделювання в програмному середовищі Ansys та експериментальні випробування для оцінки теплоізоляційних, механічних та інших експлуатаційних характеристик. Встановлено, що сендвіч-панелі з базальтовою мінеральною ватою товщиною 100 мм демонструють кращі теплоізоляційні властивості порівняно з панелями, що містять 50 мм мінеральної вати з додатковим тепловідбиваючим шаром фольги. Експериментальні дані показали, що температура в конструкції з 100 мм утеплювача знижується повільніше, від 22°C до 15.7°C за три години, тоді як у конструкції з 50 мм мінеральної вати та фольгою температура знижується до 17.8°C за той же період, що підтверджує вищу енергоефективність товстішого ізоляційного шару. Додавання фольгованого шару частково компенсує зменшену товщину утеплювача шляхом відбиття інфрачервоного випромінювання, однак цього недостатньо для досягнення теплоізоляційних характеристик, аналогічних панелям із товстішим шаром мінеральної вати.

Зовнішні шари зі сталевого листа товщиною 1 мм забезпечують міцність і захист від деформацій, а дерев'яна панель ОСБ товщиною 11 мм підвищує жорсткість і сприяє додатковій теплоізоляції. Така комбінація матеріалів забезпечує стійкість до механічних навантажень і температурних перепадів у діапазоні від -20°C до +20°C, що підтверджено результатами моделювання. Чисельний аналіз у Ansys показав, що тепловий потік через сендвіч-панель із мінеральною ватою товщиною 100 мм стабілізується через 7200 секунд, досягаючи термодинамічної рівноваги, з поступовим вирівнюванням температури від зон нагріву до холодніших ділянок, що свідчить про ефективність теплоізоляції.

Щодо пожежної безпеки та звукоізоляції, базальтова мінеральна вата вирізняється високою вогнестійкістю, відповідаючи класу НГ і витримуючи температури до 1500°C, а також забезпечує звукоізоляцію на рівні 35 дБ, що

робить її оптимальним вибором для будівель із підвищеними вимогами до безпеки та комфорту. Пінополіізоціанурат демонструє порівнянну вогнестійкість за стандартом EN 13501-1 і вищу звукоізоляцію в межах 52–60 дБ, але характеризується вищою собівартістю.

Використання сендвіч-панелей із мінеральною ватою товщиною 100 мм є доцільним для енергоефективних будівель, що експлуатуються в умовах значних температурних перепадів, оскільки це сприяє зниженню витрат на опалення та кондиціонування, а також розширює сфери застосування в промисловому та житловому будівництві. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію комбінацій матеріалів, зокрема шляхом використання гібридних наповнювачів, та вдосконалення методів монтажу для підвищення герметичності й зменшення теплових мостів. Отримані результати підтверджують, що сендвіч-панелі з базальтовою мінеральною ватою товщиною 100 мм є перспективним рішенням для сучасного будівництва, забезпечуючи оптимальне поєднання енергоефективності, міцності, пожежної безпеки та звукоізоляції.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mironov, V., Lisicins, M., & Boiko, I. (2021). Sandwich Panels Made of Perforated Metal Materials. *Solid State Phenomena*, 320, 155 - 160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.320.155>.
2. Li, Y., Zhen, Y., Xiang, L., Weibo, Z., & Liu, H. (2020). Research Status of Mechanical Properties of Metal-faced Sandwich Panels for Building Construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 525. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/525/1/012042>.
3. Steineck, S., & Lange, J. (2023). Influence of Temperature on the Behavior of Sandwich Panels. *ce/papers*, 6. <https://doi.org/10.1002/cepa.2305>.
4. Mohammadabadi, M., Yadama, V., & Dolan, J. (2021). Evaluation of Wood Composite Sandwich Panels as a Promising Renewable Building Material. *Materials*, 14. <https://doi.org/10.3390/ma14082083>.
5. Steineck, S., & Lange, J. (2024). Material Behavior of PIR Rigid Foam in Sandwich Panels: Studies beyond Construction Industry Standard. *Materials*, 17. <https://doi.org/10.3390/ma17020418>.
6. СтройКАН: Мінеральна вата, характеристики та використання <https://stroykan.com.ua/uk/mineralna-vata-harakteristiki-ta-vikoristannya>.
7. Конструктив: Пінополістирол: види та їх особливості <https://konstruktyv.ua/blog/penopolistirool-vidy-i-ih-osobennosti/>.
8. PRU PROTECTION: Що таке пінополіуретан? <https://www.ppu-protection.com/pinopoliuretan/shho-take-pinopoliuretan/>.
9. Будівництво малоповерхнових швидкоспоруджуваних, енергозберігаючих житлових будинків із СІП-панелей. Ципріянович Ігор, Олексан Старченко, Дмитро Гулін, Сергій Клименко 2021 р. <https://lib.imzo.gov.ua/wa-data/public/site/books2/pidrucnyky-posibnyky-profosvita/Budivnyztvo-2021.pdf>.

10. Корпорація Промстан: Характеристика сендвіч-панелей з утеплювачем з пінополіуретану / пенополіізоціанурата

<https://www.promstan.com.ua/ua/production/sendvich-paneli-s-poliuretanom>

11. ДСТУ Б В.2.7-318:2016 Вата мінеральна. Технічні умови

12. Посилання на зображення базальтового утеплювача

<https://avbuilding.com.ua/ru/bazaltovyj-uteplitel-shtock-unisoft-100-600-1000mm-pl-30/p-931.html>

13. ФВА З.Б. Литвин Навчальний посібник, Тернопіль 2007

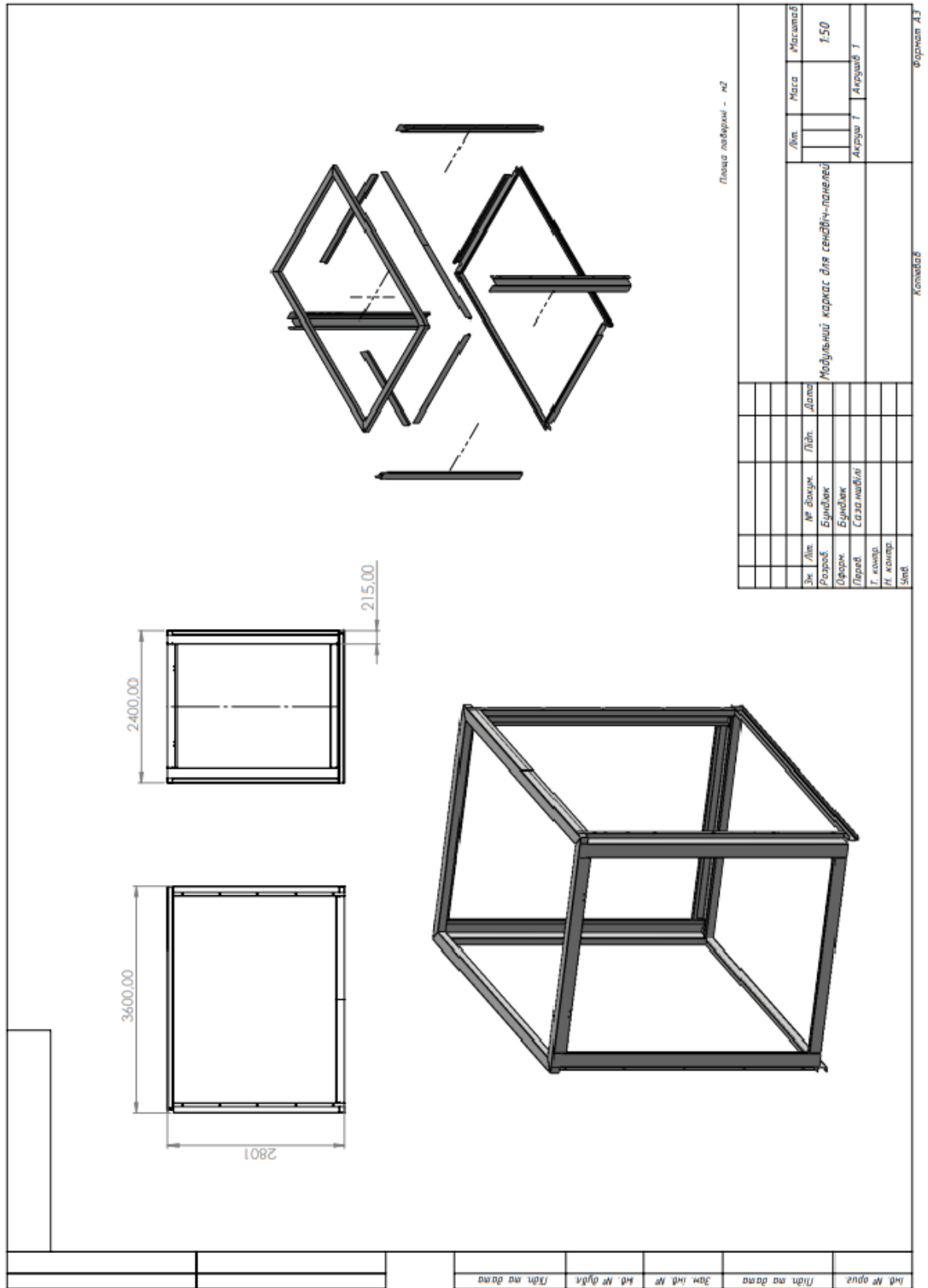
<https://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/462/1/Функціонально-вартісний%20аналіз.pdf>

14. Комп'ютерне моделювання систем та процесів Богач І.В. Кветний Р.Н. Софіна О.Ю. Системи автоматизованого проектування

https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp%27yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t1/173..htm

ДОДАТОК А

Креслення модульного каркасу для встановлення сендвіч панелей зі схемою та ізометрією



ДОДАТОК Б

Креслення загальних габаритів та вигляд в ізометрії сендвіч-панелі

