

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Колесников Андрій Валерійович

УДК 666.9.01:519.6

**МЕХАНІЗМИ БАГАТООСЕРЕДКОВОГО
СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ
ГІПСУ**

05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби

19 - Архітектура та будівництво

Реферат

Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук



Одеса– 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор **Вировой Валерій Миколайович**, професор кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор **Нетеса Микола Іванович**, професор кафедри будівельного виробництва та геодезії Українського державного університету науки і технологій

Доктор технічних наук, професор **Сердюк Василь Романович**, професор кафедри будівництва, міського господарства і архітектури Вінницького національного технічного університету

Доктор технічних наук, професор **Саницький Мирослав Андрійович**, завідувач кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка».

Захист відбудеться “02” червня 2025р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради 41.085.01 за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 4, Одеська державна академія будівництва та архітектури, головний корпус, зала засідань.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеській державній академії будівництва та архітектури (65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4).

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради 41.085.01



І.А.Карпюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Будівельні композити на основі гіпсу є одними з найбільш перспективних матеріалів у сучасному будівництві завдяки їхній економічності, екологічності та універсальності застосування. Однак для забезпечення їхньої тривалої експлуатації та відповідності сучасним вимогам щодо міцності, стійкості до агресивних середовищ і довговічності необхідно глибше розуміти механізми структуроутворення, які визначають кінцеві властивості цих матеріалів.

Процес формування структури будівельних композитів на основі мінеральних в'язучих і, зокрема гіпсу, є складним і багатофакторним, оскільки містить різні перетворення, що відбуваються на всіх рівнях організації матеріалу – від молекулярного до макроскопічного. При цьому, внаслідок взаємодії осередків структуроутворення, які формуються в процесі твердіння композитного в'язучого тіста, наповнювача та інших компонентів, відбуваються процеси багатоосередкового структурування. Осередки росту нової фази згодом утворюють суцільну структуру матеріалу. Механізми відповідних перетворень є основою для формування будівельних виробів як системи.

В умовах експлуатації будівельних матеріалів, які часто піддаються впливу різноманітних зовнішніх факторів, здатність матеріалу своєчасно реагувати на ці зміни має вирішальне значення. В цьому контексті кероване багатоосередкове структурування виступає ключовим механізмом, що дозволяє створити структуру матеріалу, яка забезпечує йому достатню стійкість і довговічність. Тому дослідження процесів, що відбуваються при багатоосередкованому структуроутворенні композиційних матеріалів на основі гіпсу є актуальним для отримання композитних матеріалів з необхідними властивостями.

Актуальність роботи полягає також у необхідності покращення моделей структуроутворення композиційних матеріалів, розробки нових підходів до моделювання, прогнозування і оптимізації процесів структуроутворення в будівельних композитах. При цьому важливим завданням є створення математичних моделей, які враховують топологічні, геометричні та фізико-хімічні аспекти структури матеріалів. Такий підхід дозволить підвищити якість кінцевого продукту і розробити рекомендації для оптимізації технології композиційних матеріалів.

Таким чином, дослідження механізмів багатоосередкового структуроутворення будівельних композитів має велике практичне значення для підвищення їхньої функціональності та довговічності. Це дослідження сприятиме розвитку нових методів контролю якості будівельних матеріалів, що є надзвичайно важливим в умовах сучасного будівництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота підготовлена відповідно до напрямку науково-дослідної роботи кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій та кафедри хімії та екології Одеської державної академії будівництва та архітектури і

пов'язана з держбюджетною темою «Фізико-хімічні аспекти структуроутворення та руйнування будівельних композиційних матеріалів» в 2021-2025 рр. (номер держреєстрації - 012U111786).

Мета роботи і завдання дослідження. Метою роботи є розробка і аналітичний опис основних принципів багатоосередкового структуроутворення з врахуванням самоузгодженої взаємодії індивідуальних елементів, процесів та явищ, що дозволяє направлено керувати властивостями будівельних композитів на основі гіпсу.

Для досягнення мети було визначено такі завдання дослідження:

- розробити варіант опису композиційних матеріалів, що базується на конструюванні простору системних координат та застосуванні формалізованого варіанту теорії систем; на основі теоретико-системного аналізу зробити класифікацію структурних рівнів композиційних матеріалів та процесів у них за ступенем важливості для аналізу процесів структуроутворення; обґрунтувати виділення проміжного рівня взаємодії, як вузлового пункту формування структури матеріалу;

- сформувати уявлення про структуроутворення з позиції топологічних трансформацій зв'язаності, роду та ступеня зачеплення твердої дисперсної фази та дисперсійного середовища композиційного матеріалу, що формується; розглянути еволюцію уявлень про межі розділу з позиції системних та топологічних уявлень;

- розробити методику моделювання композиційних матеріалів на основі геометричної параметризації та теорії динамічних систем (далі таке моделювання називається геометродинамічним, що відображає зміну геометричних властивостей у часі); розглянути реалізацію коливальних процесів у геометродинамічній системі, їх структурно-геометричну інтерпретацію та експериментальні дані, що підтверджують можливість виникнення відповідних коливальних режимів;

- дослідити керовану геометродинамічну градієнтну модель еволюції структури матеріалу при варіації параметрів управління, що виникають через процеси на мікрорівнях (наприклад, гідратації); розглянути теорію морфогенезу композиційних матеріалів на цій основі, а також форми структурних потенціалів градієнтної геометродинамічної системи та можливість їх застосування для моделювання процесів структуроутворення;

- дослідити механізми формування кластерів та меж розділу за рахунок процесу поширення впливу від центральної структуроутворюючої частинки, зокрема процесу зростання гідратних новоутворень від центральної великої частинки в'язучого до периферії кластера; проаналізувати характер меж розділу між кластерами, що містять слабковпорядкований матеріал зі зниженими локальними характеристиками міцності, а також причини і механізм їх формування за рахунок конкуруючої дії сусідніх структуроутворюючих частинок; обґрунтувати виділення мережі багатогранників Вороного, грані яких рівновіддалені від сусідніх структуроутворюючих частинок, як структури найбільш ймовірного проходження процесів руйнування матеріалу;

– проаналізувати топологічні уявлення про трансформацію матеріалу при структуроутворенні та системну інтерпретацію часткової синхронізації структурних трансформацій підсистем матеріалу на основі аналізу перетворених кривих структуроутворення та практичне застосування геометричних моделей багатоосередкового структуроутворення для оцінки структури руйнування композиційних матеріалів та топологічних уявлень про трансформацію фаз композиційних матеріалів для визначення термінів тужавлення фізичними методами;

– розробити тепловізорний метод дослідження просторових екзотермічних процесів багатосередкового структуроутворення композиційних матеріалів та методи комп'ютерного аналізу тепловізійних зображень для відображення та аналізу ієрархії термічних осередків як непрямого відбиття осередків структуроутворення в композиті, що тужавіє; визначити непряме термічне відображення структур руйнування; запропонувати методику тепловізійного дослідження екзотермічних процесів для практичного застосування при дослідженні будівельних виробів;

– розглянути можливість розширення діапазону і різноманітності досліджуваних фізичних характеристик матеріалів в бік комбінованих властивостей як критеріїв оптимізації і величин, які більш обумовлені структурними характеристиками композиту та застосувати одержані критерії до оптимізації властивостей композиційних матеріалів; розробити і застосувати для практичних завдань складні критерії оптимізації.

– розробити і здійснити промислове впровадження композиційного гіпсовміщуючого матеріалу з покращеними тепло- та звукоізоляційними характеристиками, а також обґрунтувати техніко-економічну ефективність його виробництва і найбільш ефективні напрямки використання.

Об'єкт дослідження – процеси багатосередкового структуроутворення композицій на основі гіпсу з врахуванням багатоваріантної взаємодії їх компонентів.

Предмет дослідження – структурно-функціональні відношення в композитах на основі гіпсу як у відкритих складних систем, що самоорганізуються.

Методи досліджень. Для дослідження будівельних композитів застосовувалися як методики та випробувальне обладнання, стандартизовані за державними нормами, так і спеціально розроблені. Досліди проводилися на модельних препаратах матеріалу, що твердне, та дослідних зразках стандартних форм і розмірів. Структурно-механічні характеристики визначалися за діючими стандартизованими методиками. Криві часових змін фізичних властивостей матеріалу – температури, електропровідності, діелектричних втрат та швидкості ультразвуку, були отримані із застосуванням спеціальної вимірювальної техніки. Просторові термічні процеси, які пов'язані з екзотермічною гідратацією матеріалу, досліджувалися за допомогою тепловізійної методики з наступною обробкою зображень. Структура матеріалу на різних стадіях структуроутворення досліджувалися методами комп'ютерної мікроскопії з залученням алгоритмів обробки зображень та статистичних

методів.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, полягають в тому, що:

- запропоновані методи дослідження композиційних матеріалів на основі гіпсових в'язучих в системних координатах. За допомогою розробленого алгоритму опису дослідження систем дано визначення матеріалу як динамічної ієрархічної системи. Системно обґрунтована важливість ієрархічної взаємодії різних структурних рівнів організації композиційних матеріалів. Проміжний рівень взаємодії елементів мікро- і макроструктури виділений як такий, де найсильніше проявляється системна ознака емерджентності – виникнення нових системних властивостей;

- визначена роль зміни потенціалу взаємодії між частинками в'язучого і наповнювача у складі в'язучого тіста. Продемонстрована роль флуктуаційних та релаксаційних явищ в зміні локальних структурних характеристик матеріалу;

- застосований топологічний підхід до структуроутворення. Визначена важливість топологічної перебудови матеріалу під час формування та трансформації його структури. Зміна властивостей композиційного матеріалу у його життєвому циклі розглянуто як наслідок процесів топологічного перетворення – зміни зв'язаності, роду та характеру зачепленості фаз матеріалу як дисперсної системи;

- запропоновані геометродинамічні моделі структуроутворення, у яких використовується методи геометричної параметризації структури. Часові взаємопов'язані зміни об'ємних частин, що відповідають одно-, дво- та тривимірним структурним компонентам матеріалу, відображені геометродинамічною диференційною системою. Коливальні явища, що спостерігаються при структуроутворенні, пропонується тлумачити як ті, що затухають, або автоколивання в досліджуваній системі;

- запропонована модель структуроутворення, що базується на біфуркаційних явищах у керованій градієнтній геометродинамічній системі, потенціальна функція якої залежить від співвідношення частин структурних елементів різної розмірності (структурний потенціал). Керуючі параметри розглянуті як такі, що мають мікроскопічне походження і відображають вплив мікрорівнів на структури проміжного рівня і обумовлені, зокрема, явищами гідратації. Запропоновані та обґрунтовані гіпотези щодо механізмів формування кластерних структур, які базуються на виникненні фаз чутливості матеріалу до зовнішніх та внутрішніх структурно-механічних впливів, що відбивається у моделі як біфуркація структурного потенціалу;

- запропонована геометрична модель формування «структур руйнування» матеріалу – сітки розупорядкованих структур зі зниженими локальними міцнісними характеристиками, що сформувалися на границі різних структурно-механічних впливів. Також запропонована наближена геометрична модель структури руйнування, що дається розбиттям Вороного, побудованого на основі розподілу структуроутворюючих частинок в складі композиту;

- запропонований метод дослідження процесів структуроутворення, що полягає в поєднанні тепловізорного дослідження екзотермічних процесів, які

супроводжують процес тужавлення, з комп'ютерною обробкою зображень. Метод дозволяє виділити термічні осередки структуроутворення;

- покращений метод аналізу кривих структуроутворення композитів на основі гіпсу через їх перетворення в графік зміни кривизни. Виявлено тенденцію до групування особливостей набору кривих структуроутворення. Запропоновано системне та топологічне тлумачення перетворень твердої фази, шарів молекул зв'язаної води та вільної води капілярно-пористої структури, що сумарно займають постійний об'єм матеріалу;

- розроблені та застосовані методи переходу до набору комбінованих властивостей матеріалу, що ґрунтовніше пов'язані зі структурними характеристиками і являють собою комбіновані критерії оптимізації матеріалів.

Подальший розвиток отримали:

- теоретичні уявлення про роль структурно-геометричних особливостей у механізмах структуроутворення композиційних матеріалів;

- закономірності утворення кластерної структури та міжкластерних границь в нерівноважних умовах, що супроводжують формування композитів;

- топологічні, дискретні та геометродинамічні моделі структуроутворення композиційних матеріалів;

- алгоритми перетворення безперервних експериментальних кривих структуроутворення, що покращують інтерпретаційну здатність методів дослідження.

Практичне значення одержаних результатів:

- запропоновані комп'ютерно-мікроскопічні методики аналізу зображень структури композиційного матеріалу та її «миттєвого знімку» під час структуроутворення. Використання таких методик дає можливість визначати об'єм та співвідношення гідратних фаз та непрогідратованого матеріалу, характеристики розподілу крупних структуруючих частинок та пор, зокрема радіальну функцію розподілу, розбиття Вороного та Делоне, профіль відновлення густини;

- запропоновано метод тепловізорного дослідження композиційних матеріалів екзотермічного тверднення, що базується на комп'ютерній обробці тепловізорних зображень. Метод дозволяє виявляти структуру термічних осередків, які приблизно відповідають осередкам структуроутворення. Метод виявляє передумови виникнення структури руйнування в композиційних матеріалах;

- запропоновано методи побудови геометричної моделі структур руйнування квазіпланарних шарів будівельних композитів та покриттів на основі розбиття Вороного;

- запропонований метод визначення термінів тужавлення високонаповнених композитів щільної структури, для яких застосування стандартних пенетраційних методик неможливо. Метод базується на комплексному аналізі кривих структуроутворення, зокрема кривих зміни швидкості проходження ультразвуку кріз в'язуче тісто під час тужавлення;

- запропонована і застосована для оптимізації властивостей матеріалів нова характеристика водостійкості будівельних композитів на основі гіпсу –

індекс водостійкості, що сильніше відображає цільову характеристику матеріалу – міцність в водонасиченому стані;

- застосування сучасних підходів при проектуванні композитів на основі гіпсу дало змогу покращити їхні тепло- і звукоізолюючі властивості і використати його як ефективний матеріал для підлоги

- запропоновані теплозвукоізолюючі склади застосовані у ЧП «Практик», ПП «Русрембуд», КП «Будова» при влаштуванні наповненого покриття для основ під підлоги;

- теоретичні, експериментальні та методичні розробки, що приведені в роботі, використовуються в початковому процесі при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія у методичних матеріалах освітніх компонентів «Фізико-хімічні процеси в адитивних технологіях», «Дослідження і оптимізація складів матеріалу для 3D-друку», «Органічна та фізична хімія, хімія силікатів», «Фізико-хімічні методи дослідження будівельних матеріалів», «Структурування, твердіння та руйнування композиційних будівельних матеріалів».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота ґрунтується на матеріалах науково-дослідних робіт, виконаних автором на кафедрах хімії та екології, міського будівництва та господарства, виробництва будівельних виробів та конструкцій Будівельно-технологічного інституту Одеської державної академії будівництва та архітектури у 2016–2025 рр. Автору належать формулювання мети і завдань дисертації, теоретичні моделі, результати експериментальних досліджень, їх аналіз та інтерпретація, узагальнення експериментальних і теоретичних уявлень, висновки. Автор брав участь у практичних випробуваннях розроблених методик з комплексного дослідження процесів структурування та визначення термінів технологічної придатності композиційного гіпсового матеріалу з покращеними тепло- та звукоізоляційними властивостями. Базові наукові результати дисертації одержані автором самостійно, частину теоретичних та експериментальних досліджень виконано та опубліковано із співавторами, що вказано в списку наукових праць.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень були представлені на наступних конференціях і семінарах: міжнародній науково-технічній конференції «Структурування, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій» (Одеса, 2016-2024 рр.), міжнародній науково-практичній конференції «Енергоефективне місто. XXI століття», (Одеса, ОДАБА, 2020 р.), міжнародному семінарі «Моделювання та оптимізація будівельних композитів», (Одеса, ОДАБА, 2015-2024 рр.), всеукраїнській науково-практичній конференції «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві», (Одеса, ОДАБА, 2020-2024 рр.), міжнародній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», (Одеса, ОДАБА, 2020-2024 рр.), міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології», (Одеса, ОДАБА, 2021 р.), міжнародній конференції Materials Science and Engineering: IOP Conf. Series (2021 р.),

міжнародній конференції Florence Heri-Tech: the Future of Heritage Science and Technologies (2024 р.).

Дисертація здобувача не містить матеріалів кандидатської дисертаційної роботи.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 52 друкованих праць, з них 1 монографія (в співавторстві), 21 статті у фахових виданнях України, 6 статей у виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази даних Scopus та WoS, 3 статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав, 21 публікація, що засвідчує апробацію матеріалів дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 358 сторінках друкованого тексту та складається із вступу, шести розділів та загальних висновків. Повний обсяг дисертації становить 512 сторінок; робота містить 24 таблиці, 168 рисунок, список використаних джерел із 348 найменування та 5 додатків на 67 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, встановлено мету, визначено комплекс дослідницьких завдань та запропоновано робочу гіпотезу. Наведено основні теоретичні висновки та емпірично встановлені автором закономірності, що характеризуються науковою новизною та мають практичне значення.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, пов'язаних з теоретичними, модельними та емпіричними закономірностями проблеми багатоосередкового структуроутворення та його відображення у множині властивостей будівельних композиційних матеріалів (КМ). Виявлені магістральні напрямки моделювання КМ, основні результати моделювання та обмеженості існуючих моделей. Сформульовано робочу гіпотезу, спрямовану на усунення відповідних обмежень.

Будівельні КМ є складними багаторівневими системами, у яких структура і властивості формуються під впливом процесів структуроутворення. Ключовим аспектом у вивченні композитів є розуміння їхньої структури, яка визначає експлуатаційні характеристики матеріалу (роботи Л.Й. Дворкіна, А.А. Пługіна, В.М. Дерев'янка, О.Ю. Дорошенко, М.І. Нетеси, В.Р. Сердюка, М.А. Саницького, С.Й. Солодкого, О.В. Ушєрова-Маршака, О.П. Мчедлова-Петросяна, О.С. Шинкевич, Т.В. Ляшенко, В.І. Кондращенко, В.Л. Чернявського, В.П. Селяєва, Б.В. Гусєва, В.І. Мартинова, В.Г. Суханова, О.О. Коробко, А.М. Підвального, J. Dewar, J. Kasperkiewicz, W. Kurdowski, P. Stroeven, F. Wittmann, A. Brandt, D. Van Gemert, F. Tomosawa, H.-B. Fischer та ін.). Структуроутворення охоплює процеси взаємодії компонентів на різних рівнях організації – від молекулярного до макроскопічного. Важливу роль у цих процесах відіграють кластеризація частинок, формування міжкластерних меж розділу та зміна структури у часі (роботи В.М. Вирового, В.І. Соломатова, А.М. Бобришева, Г.М. Бартенева). Формування структури матеріалу є ключовим

фактором, який визначає його фізико-механічні властивості. Зокрема, кластери, що утворюються в процесі структуроутворення, є базовими структурними елементами, які взаємодіють між собою через міжкластерні границі. Ці границі формують складні ієрархічні структури, що забезпечують стійкість композитів до зовнішніх впливів. Наприклад, пори та тріщини є важливими структурними елементами, які впливають на міцність, теплопровідність, водостійкість та інші властивості. Технологічні тріщини, які виникають на етапах структуроутворення, визначають експлуатаційні характеристики матеріалів. Сучасні моделі, що описують властивості композиційних матеріалів, мають загальний характер і часто базуються на спрощених припущеннях. Наприклад, лінійні та похідні від них моделі, такі як моделі Войта та Рейсса, дозволяють оцінити модуль пружності композитів. Однак ці підходи ігнорують складність взаємодії між компонентами і не враховують змінну структуру матеріалу, вони не здатні врахувати зміну властивостей та динаміку структуроутворення. Більш складні моделі враховують структурні особливості частково (моделі Халпіна-Цая, Морі-Танака, мікромеханічні моделі самоусереднення та подібні), але вони також мають суттєві обмеження. Наприклад, моделі пористості описують зв'язок між пористістю і властивостями матеріалів, але припускають ідеалізовану геометрію пор. Це не відображає реальних умов, за яких пори можуть мати складну форму і взаємозв'язок. Аналогічно, моделі міцності часто не враховують вплив дискретної (кластерної) структури, наявності міжкластерних меж розділу, розмірів і орієнтації мікротріщин, хоча ці фактори суттєво впливають на міцність матеріалу. Враховуючи ці обмеження, важливо визначити напрямки подолання недоліків існуючих моделей.

Одним з шляхів вдосконалення моделей композитів є залучення фізичних уявлень до проблем структуроутворення. Зокрема, корисним виявляються деякі моделі статистичної фізики, зокрема теорій фазових перетворень як дискретного ґраткового типу (моделі Ізинга і її похідних), так і в безперервному варіанті (теорії Кана-Хільярда, Лангера), що описують утворення нових фаз і кластерних структур. Класична та стохастична теорія зародкоутворення, яка застосовувана до процесів на мікроскопічному рівні структуроутворення, також допускає аналогію на мезоскопічному рівні до міжкластерної взаємодії. Перколяційні моделі описують поведінку композитів із нерівномірним розподілом зв'язків, фаз або пор, що дозволяє моделювати їхню стійкість до руйнування. Другим перспективним підходом є багатомасштабне моделювання, яке охоплює всі рівні організації структури матеріалу – від нанорівня до макроструктури. Цей підхід дозволяє враховувати взаємозв'язки між процесами, що відбуваються на різних масштабах, і забезпечує більш точний опис властивостей матеріалів. Наприклад, у нанобетонах використання нанокомпонентів дозволяє досягти високої міцності завдяки оптимізації структури на нанорівні. Третім напрямком є застосування феноменологічного підходу до аналізу експериментальних результатів в його статистичній інтерпретації – експериментально-статистичного (ЕС) моделювання (роботи В.А. Вознесенського, Т.В. Ляшенко, Л.Й. Дворкіна, В.Я. Керша, С.В. Ковалю, І.В. Барабаша, Ю.М. Баженова, В.Б. Резника, А.Є. Рохваргера, Е.Г. Соркіна,

А.Є. Шейкина, В.І. Гоца, В. Велева, Я. Іванова, І. Ніколова, L.Czarnecki, Z. Piasta та ін.). Слід зазначити можливість застосування ЕС-моделювання для виявлення зв'язку «структура – властивості» КМ, при цьому структурні характеристики є «миттєвим знімком» багатоваріантного процесу структуроутворення КМ, зокрема, методів машинного навчання для аналізу складних нелінійних залежностей між складом, структурою і властивостями матеріалів. Алгоритми штучного інтелекту здатні обробляти великі обсяги даних і виявляти приховані закономірності, що дає змогу створювати нові матеріали із заданими характеристиками. Наприклад, нейронні мережі можуть прогнозувати міцність композитів на основі даних про їхній склад і процеси виготовлення.

Таким чином, сучасні моделі властивостей композиційних матеріалів мають суттєві недоліки, які пов'язані з недостатнім врахуванням структури матеріалів і складних процесів структуроутворення. Для подолання цих обмежень необхідно впроваджувати багатомасштабне моделювання, стохастичні підходи, методи машинного навчання, комп'ютерне матеріалознавство і новітні експериментальні методи. Ці підходи забезпечать створення більш точних моделей, які враховуватимуть взаємозв'язок між складом, структурою і властивостями матеріалів, дозволяючи прогнозувати їхню поведінку та оптимізувати для різних застосувань.

Аналіз відомих закономірностей структуроутворення в'язучих матеріалів та композицій на їх основі, методів моделювання таких процесів різних рівнів абстракції та направленості, дало підстави сформулювати наукову гіпотезу про необхідність залучення для подальшого розвитку відповідного напрямку віялового багатовекторного підходу, згідно з яким властивості композиційних матеріалів залежать від їхньої структури, що формується в процесі багатоосередкового структуроутворення на різних рівнях масштабу, особливо на рівні взаємодії мікро- та макроструктури. Фізико-механічні та фізико-хімічні процеси на мікрорівнях змінюють характер міжчасткової взаємодії, що є рушійною силою структуроутворення. Основні процеси структуроутворення можна моделювати, досліджуючи кількісні зміни поверхневих та об'ємних компонентів. Процес твердіння – це послідовність структурних фазових переходів. Ці геометро-топологічні перебудови впливають на фізичні властивості КМ. Під час твердіння матеріал тимчасово перебуває у стадії чутливості до структурно-механічних впливів збоку структуроутворюючих частинок. Структурні впливи передаються на периферію кластерів, що утворюються при тужавленні, в результаті на периферії кластерів формується слабковпорядкована область з пониженими міцностними характеристиками (структура руйнування), що приблизно відповідає розбиттю Вороного об'єму КМ з розподіленими у ньому структуроутворюючими центрами.

У заключній частині першого розділу відображено мету дисертаційної роботи, пов'язану з науковою гіпотезою, визначені завдання, які необхідні вирішити для її досягнення.

Другий розділ присвячений опису вихідних матеріалів, а також методів та методик, що використовувалися для дослідження процесів

структурування композиційних матеріалів. Розділ поділено на кілька підрозділів, у кожному з яких детально розглядається окремий аспект дослідження, що у сукупності дозволяє обґрунтувати робочу гіпотезу, виконати завдання роботи та досягнути її мету.

Для організації та впорядкування етапів розробки головної теми створено блок-схему роботи та запропоновано алгоритм проходження її трьох основних етапів. На етапі 1 на основі загальної теорії систем було проаналізовано процеси, що відбуваються в матеріалі на різних масштабних рівнях. Ключовим результатом стало виділення проміжного рівня взаємодії мікро- та макроструктури як області максимальної емерджентності – появи принципово нових, системних властивостей. На етапі 2 розроблялися дискретні та безперервні моделі багатоосередкового структурування. Геометро-топологічне моделювання дозволило описати процес структурування як послідовність топологічних змін, що впливають на макроскопічні властивості матеріалу. Створено моделі фрактальних кластерів та геометродинамічні моделі, що описують еволюцію структури в геометричному просторі. На основі теорії катастроф сформульовано концепцію морфогенезу композиту, що пояснює формування кластерних структур та диференціацію матеріалу. Головним результатом цього етапу стало створення геометричної моделі морфогенезу матеріалу. На етапі 3 уточнювалися механізми морфогенезу матеріалів як структурних перетворень. Показано, що різні механізми, включаючи вплив структуруючих частинок та зміщення наповнювача, призводять до формування на периферії кластерів слабо впорядкованої структури. Запропоновано геометричну модель границь між кластерами – розбиття Вороного. Встановлено зв'язок між мікроструктурою та макроскопічними властивостями матеріалу, такими як швидкість поширення ультразвуку, екзотермія та діелектричні втрати. Застосування теорії перколяції дозволило описати процеси структурної інтеграції. Таким чином, дослідження дозволило комплексно описати процес структурування композитів, від теоретичного аналізу до конкретних моделей та експериментальних даних, виявивши ключові механізми та закономірності цього процесу.

У роботі використовувалися стандартні методи дослідження властивостей матеріалів: визначення строків тужавлення цементно-водних композицій, визначення міцності зразків при стиску та на розтяг при згині, визначення пластичної міцності в'язучого тіста, вимірювання швидкості проходження ультразвукових хвиль. Випробування проводили на зразках гіпсовміщуючого композиційного в'язучого тіста, що тужавіє.

Для аналізу структури композиційних матеріалів використовувалися методи комп'ютерної обробки зображень за допомогою програм ImageJ, NihImage. Ці програми дозволяють імпортувати зображення та аналізувати геометричні параметри частинок за їхніми зображеннями, що одержані методами сегментації, зокрема методом «вододілу» (рис.1).

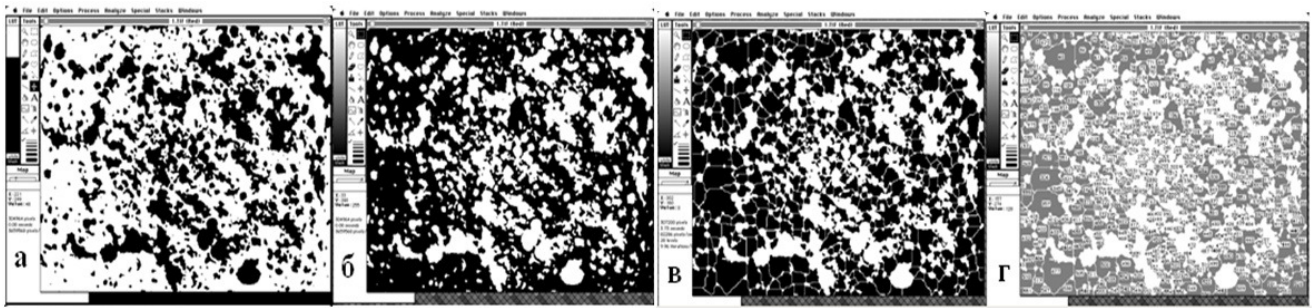


Рис.1. Основні етапи алгоритму виділення міжчастинкових та міжпорових проміжків: а - порогове поділ та бінаризація; б - інверсія; в - сегментація міжпорового (міжчастинуового) простору шляхом вододілу; г - виділення міжпорових проміжків

В роботі описані розроблені алгоритми автоматичного вимірювання об'єктів, дослідження геометричних параметрів проміжків між ними, заповнених матричним матеріалом. Для дослідження процесу структуроутворення було розроблено алгоритм, що містить перетворення мікрофотографій у цифрові знімки, аналіз гістограм розподілу яскравості. Застосовувалися два способи аналізу гістограм: аналіз характеру зміни кута нахилу дотичної до інтегральної функції розподілу та апроксимація функції розподілу сумою гаусівських кривих. Описано процедуру обробки зображень та побудови гістограм. Наведено приклади апроксимації гістограм сумою гаусівських розподілів (рис.2).

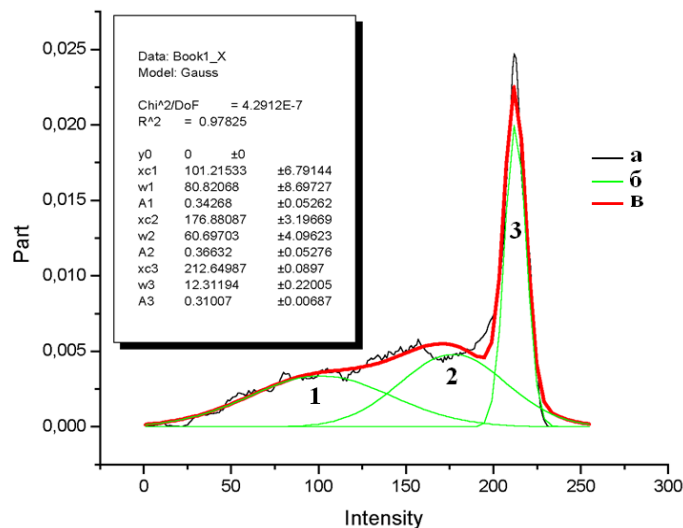


Рис.2. Метод виявлення за зображенням препарату гіпсу, що тужавіє, співвідношень різних фаз – розчинної (пік 1), новоутворень (пік 2), ущільненого матеріалу (пік 3): а – емпірична гістограма; б – складові різних фаз; в – сумарна змішана гістограма

Площа під піками відповідних гаусівських кривих відповідає частці площі препарату, зайнятій, відповідно, розчинною частиною (пік 1,33%), кристалічним новоутворенням середньої інтенсивності (пік 2,36%), ущільненим матеріалом (пік 3,31%). Перевагами запропонованих методів є можливість дослідження часового перебігу процесів структуроутворення у модельних

мікроскопічних препаратах, як процесу кількісних змін частин трьох фаз – розчинної (насичений та перенасичений розчин сульфату кальцію), кристалічної фази новоутворень (кристали двоводного гіпсу в модельному препараті) та загальної твердої фази, яка складається з частинок вихідного матеріалу, що розчинюється, та кристалів новоутворень, що ростуть переважно з поверхні частково прогідратованих частинок вихідного матеріалу.

Аналіз часових характеристик процесів структуроутворення ґрунтується на дослідженні кривих структуроутворення, що відображають зміни властивостей гіпсового в'язучого тіста у часі. Для їх побудови досліджувалися тепловиділення гідратації, діелектричні втрати, електропровідність та швидкість проходження ультразвуку через шар композиційного в'язучого, що твердне. Для дослідження тепловиділення використовувався калориметр, діелектричні властивості вимірювалися безконтактним методом в сконструйованій установці на базі діелькометру-вологоміру, електропровідність досліджувалася на змінному струмі в сконструйованій комірці, ультразвукові властивості досліджувалися в установці на основі приладу для ультразвукового контролю конструкцій УК-56П. Для виявлення прихованих особливостей експериментальні криві піддавалися поетапному перетворенню, що включає нормування даних для усунення впливу різних одиниць вимірювання, перехід до графіків кривизни для виявлення точок перегину та екстремумів, та спільний аналіз особливостей для порівняння кривих зміни кривизни різних властивостей та виявлення спільних часових інтервалів змін. Розроблена сукупність методик дозволила виявити низку структурних перетворень в'язучого тіста та дати їх геометро-топологічне тлумачення з залученням концепцій теорії перколяції. Два з них відповідають термінам початку та кінця тужавлення, що дозволяє запропонувати методики для точного визначення цих термінів, коли нормативні методи відмовляють, наприклад, в випадку високонаповнених композитів.

Екзотермічні процеси гідратації пов'язані прямими і зворотними причинно-наслідковими зв'язками з параметрами структури, що формується під час тужавлення. Методика дослідження твердіння гіпсових композитів базується на тепловізійному аналізі з періодичною фіксацією теплових знімків, що відображають інтенсивність тепловиділення. Для аналізу застосовувалась комп'ютерна обробка зображень. Дослідження містило фіксацію тепловізійних зображень, їх комп'ютерну обробку для виявлення інформативних характеристик та зіставлення цих характеристик з етапами структуроутворення. Знімки отримували за допомогою установки на основі промислового тепловізора RX-680, з періодичністю 1 хв протягом 40 хв. Гіпсове в'язуче тісто, що моделює композит, розміщувався у відкритому теплотричному осередку. Паралельно фіксувався час початку та кінця тужавлення. Комп'ютерна обробка знімків у 8-бітному форматі проводилась за допомогою Scion Image з температурним калібруванням, побудовою гістограм та зрізів інтенсивності для виділення ділянок з різною температурою, а також виділенням границь з подальшою еквалізацією гістограм для якісної інтерпретації механізмів структуроутворення (рис.3).

Додатково проводились денситометричні дослідження (радіальний розподіл температур та розподіл поблизу границь) з подальшою якісною інтерпретацією отриманих гістограм та денситограм.

Зроблено висновки, що застосовані методи дослідження, як стандартні, так і розроблені, базуються на отриманні "миттєвих знімків" структури матеріалу, що відображають процес багатоосередкового структуроутворення безпосередньо або через зміни фізичних параметрів та властивостей.

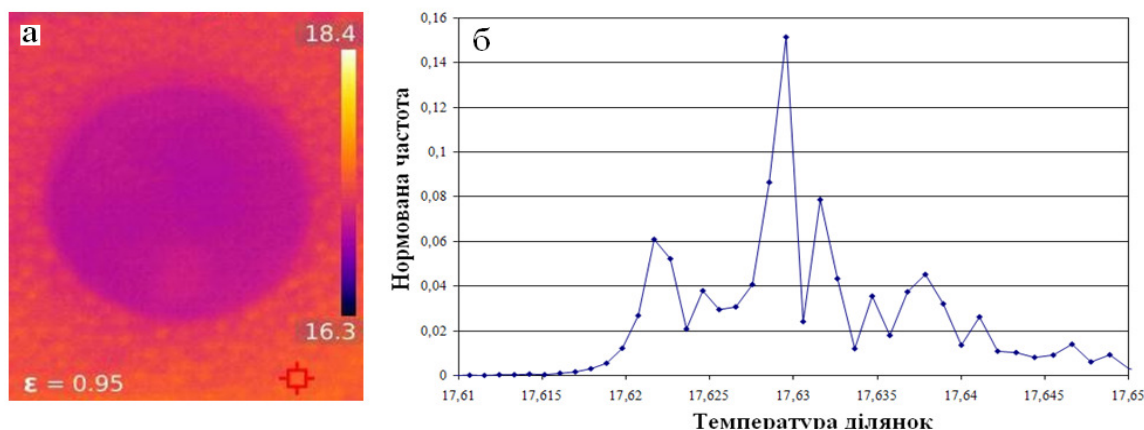


Рис.3. Елементи тепловізійного дослідження екзотермічних процесів:
а – теплові зображення гіпсу, що твердне, б – полігон розподілу термічних осередків

Ці методи, використані сумісно, слугують основою для створення теоретичних та математичних моделей багатоосередкового структуроутворення. Деякі з них, зокрема, метод кривих структуроутворення та тепловізорне дослідження, важливі для вивчення процесів твердіння та вирішення практичних задач матеріалознавства.

Третій розділ присвячено багатовекторному вивченню механізмів структуроутворення і їх моделей в композиційних матеріалах. У розділі підтверджено, що експлуатаційні властивості композиційних матеріалів безпосередньо залежать від їхньої внутрішньої структури, формування якої відбувається в процесі структуроутворення протягом життєвого циклу матеріалу. Найбільш інтенсивно процес утворення структури відбувається при тужавленні. Показано, що процеси структуроутворення відбуваються на різних структурних рівнях, кожен з яких характеризується власними механізмами та часовими масштабами. Підкреслено важливість взаємодії цих процесів на всіх рівнях, особливо на проміжному, де спостерігаються як гравітаційні ефекти, так і різноманітні міжчастинкові взаємодії, типові для дисперсних систем. З метою аналізу складності змін, що відбуваються на різних масштабних рівнях, у роботі застосовано комплексний підхід, що поєднує методи загальної теорії систем та математичні моделі структурних перетворень.

У розділі для аналізу процесів у композитах використано теоретико-системний підхід, під яким розуміється метод, який дозволяє розглядати композити як єдину систему з урахуванням їхньої морфології, структурної організації та динаміки змін у процесі експлуатації. Розглянуто уявлення, згідно

з якими матеріал представлено в системі діалектичних пар протилежностей, таких як "дискретність – безперервність", "частина – ціле", "необхідність – випадковість". Детальний розгляд пари "дискретність – безперервність" дозволив провести фізичну аналогію між процесами зародкоутворення при кристалізації та формуванням кластерів. Дослідження відношень "необхідність – випадковість" дало можливість здійснити теоретико-інформаційне тлумачення процесу, де утворення зародкової структури та її подальше зростання інтерпретуються як рецепція та трансформація інформації, що міститься в системі частинок, які беруть участь у броунівському русі. Для практичного застосування теорії систем у дисертації розроблено троїсте представлення об'єкта: структурна (стала), функціональна (мінлива) та емерджентна (результат синтезу) підсистеми. Встановлено, що емерджентною складовою є проміжний рівень взаємодії мікро- та макроструктур.

Розглянуто трансформацію композиційного матеріалу з топологічної точки зору, як зміну топологічних характеристик дисперсної фази та дисперсійного середовища, таких як зв'язність, рід та зачепленість. Показано, що кожній топологічній зміні відповідає певний процес у структуроутворенні. Синтез теоретико-системного та топологічного підходів дозволив простежити еволюцію уявлень про границі розділу. Зроблено висновок, що в багатьох матеріалах вони є розрідженими структурами, що виникають внаслідок перерозподілу частинок під час багатоосередкового структуроутворення.

Для аналізу формування структури застосовано фізико-геометричну параметризацію, що передбачає проєктування реальних структур на геометричний простір, який задається системою об'ємних частин, точкових, лінійних, поверхневих та власне об'ємних компонент. Досліджено динаміку структурних перетворень у геометричному просторі як у фазовому, де існує фазовий потік, що задається системою диференціальних рівнянь. Встановлено, що система може бути декомпонована на градієнтну та консервативну складові, остання з яких описує ротаційні рухи, пов'язані з коливаннями. Показано, що градієнтна система значно спрощується при врахуванні лише поверхневої та об'ємної складових. Зроблено висновок про можливість ототожнення потенціалу цієї системи зі структурним потенціалом, що відповідає омбілічним катастрофам, зокрема гіперболічній омбіліці (1):

$$V(y_2, y_3) = y_2^3 + y_3^3 + wy_2y_3 - uy_2 - vy_3, \quad (1)$$

де y_2 відповідає вмісту поверхневих компонент; y_3 – об'ємних, при фіксованому розбитті за масштабами; w, u, v – параметри керування.

Встановлено, що коливальні ефекти відображають динаміку твердіння та проявляються у вигляді характерних "пилкоподібних" графіків міцності та пластичної міцності, а також у коливаннях швидкості наростання міцності. Запропоновано геометричну та динамічну інтерпретацію цього явища як циклічного процесу, що реалізується при твердінні гіпсових в'язучих. Показано, що коливання базуються на циклічному механізмі утворення структурного каркасу під час гідратації, його обростання, подальшого зростання напруження та руйнуванні каркасу, збільшенні поверхні контакту в'язучого з

розчином, посиленні гідратації. На основі цього зроблено висновок, що коливальні ефекти при структуроутворенні є результатом динамічного балансування між процесами утворення та руйнування структурних елементів під впливом фізико-хімічних факторів.

У розділі досліджено застосування методу структурних потенціалів з використанням апарату теорії катастроф для аналізу структуроутворення в стохастичних градієнтних системах. Показано, що процес можна розглядати як явище, зумовлене особливостями структурного потенціалу та їх трансформацією під впливом фізико-хімічних параметрів. Розглянуто модель побудови структурно-фазової діаграми за аналогією до методу Гіббса-Розебуму на трикутнику, координатами якого є частини компонентів з різною геометричною структурою (рис.4).

Феномен поліструктурності пояснюється характером флуктуаційно-дисипативних процесів у системі, що вивчається в термінах структурного потенціалу та розподілу структурних параметрів.

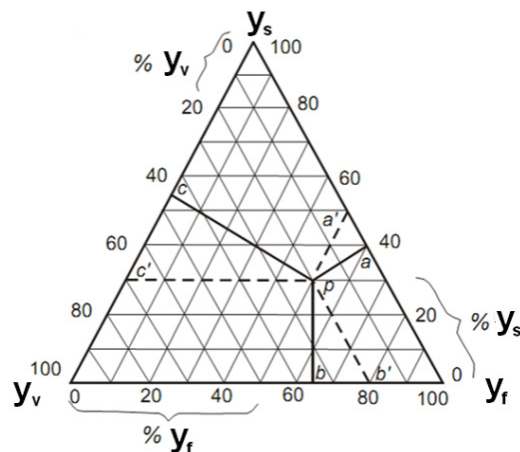


Рис. 4. Застосування графічних методів теорії трикомпонентних фізико-хімічних систем для відображення фізико-геометричних характеристик матеріалу: y_v – об'ємна частина тривимірного матеріалу; y_s – об'ємна частина осередків, зайнятих двовимірними структурами; y_f – об'ємна частина осередків, зайнята вільним об'ємом або матеріалом у розчиненій формі; точка P відповідає фізико-геометричному стану матеріалу; смугові лінії відповідають методу Гіббса, пунктирні – методу Розебуму

Досліджено один із загальних механізмів утворення кластерної організації, що полягає у послідовності структурних фазових перетворень. Встановлено, що в результаті цих перетворень квазірівномірний розподіл частинок, що відповідає результату первинного перемішування композиційного в'язучого тіста, стає нестійким. Показано, що така зміна може відбуватися внаслідок різноманітних фізико-хімічних змін, таких як гідратаційні явища, зміни характеру розподілу зарядів на молекулах полімерів, зміни об'єму матеріалу під час гідратації та зміни міжчасткових потенціалів. На першому етапі тужавлення стійкими є розподіл осередків з ділянками матеріалу більшої щільності частинок та зв'язків між ними (кластери) та розріджена сітка з меншими значеннями щільності частинок і зв'язків та іншим мезоскопічним

складом. Така сітка містить міжкластерні межі розділу. За першою біфуркацією може відбуватися друга, вже у диференційованому матеріалі. У дисертації встановлено, що структурний потенціал відповідає "морфогенетичному ландшафту" матеріалу, подібному до того, що застосовується для опису біологічного морфогенезу (рис.5).

Підкреслено, що структуроутворення матеріалу, подібно до морфогенезу, є динамічним процесом, що розгортається у часі. Оскільки як вихідна щільність і склад, так і результат первинної диференціації схильні до просторових флуктуацій, шлях переходу кожної ділянки матеріалу в новий стійкий стан відрізняється. Цей факт, а також взаємодія сусідніх ділянок матеріалу, пояснює мозаїку просторового розподілу щільності та складу композиту.

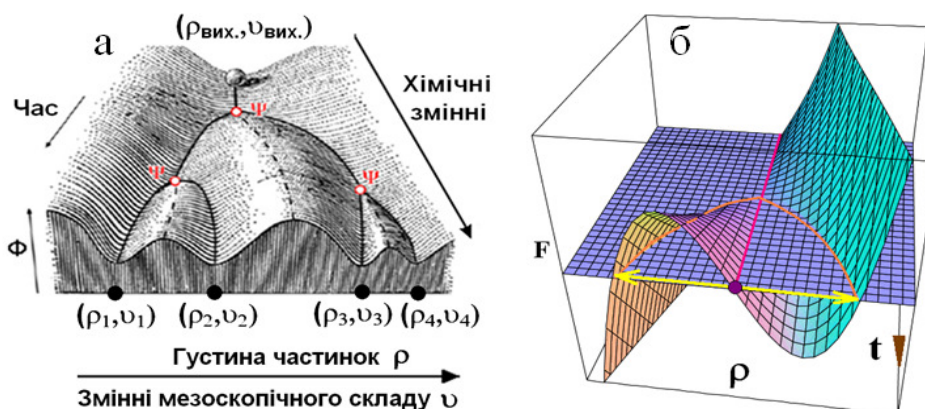


Рис.5. Морфогенетичний ландшафт матеріалу (а) і його модель (б)

Досліджено механізм відцентрового кластероутворення та його реалізацію для композиційних гіпсових в'язучих. Показано, що процес твердіння гіпсових композитів визначається формуванням гідратних новоутворень, які утворюються переважно на поверхні зерен напівводного гіпсу в умовах середньої стисненості. Основними фізико-хімічними етапами є гідратація поверхневих шарів, кристалізація зародків, а також розвиток полікристалічної структури кластерного типу. На основі мікроскопічних досліджень виявлено, що перші контакти нової фази утворюють точкові зв'язки. Подальше зрощення кристалів створює сітчасту структуру, яка характеризується значною кількістю дефектів та тріщин. Структура кластеру складається з частково прогідратованого зерна, мікрочастин на його поверхні та зони з менш упорядкованою структурою. Результати моделювання, проведені з використанням рівнянь Колмогорова та Єрофеева в логарифмічній формі (2):

$$\ln(-\ln(q(t))) = \ln(c \beta v^k) + k \ln t, \quad (2)$$

де k - розмірність моделі (і кристала, що росте); v - швидкість росту зародків; c - фактор форми зародків, дозволили охарактеризувати процеси кристалізації у двох основних моделях: зі швидкістю утворення зародків або з початковим наявним їх набором.

Аналіз термограм свідчить про кусочно-лінійну залежність етапів твердіння, що містить періоди до і після початку тужавлення (рис.6).

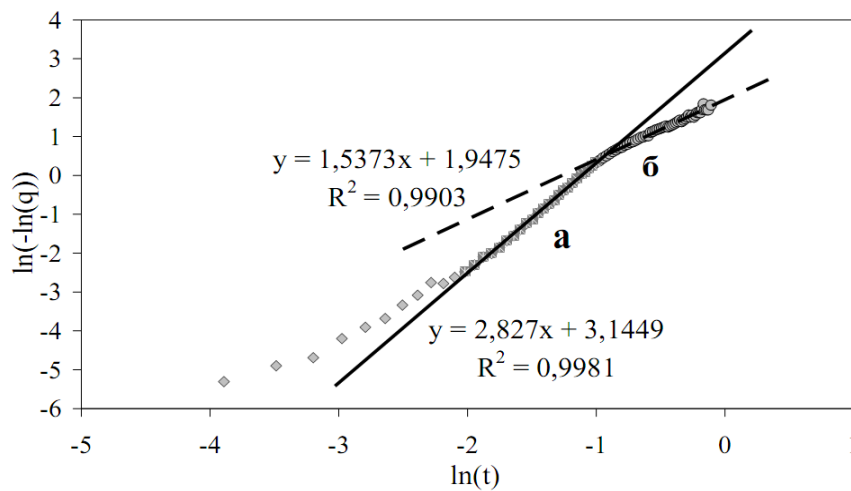


Рис. 6. Статистичний аналіз процесу структуроутворення будівельного гіпсу Г10 за рівнянням Колмогорова – часова залежність частини рідкого середовища q під час твердіння, в функціональній шкалі

Зменшення швидкості росту кристалів після початку тужавлення пов'язане з утворенням фазових контактів. Практичним результатом є встановлення ключових параметрів структуроутворення гіпсових матеріалів, що дозволяє прогнозувати їх поведінку в умовах низького водо-твердого відношення. Виявлено, що структуроутворення гіпсових композитів характеризується інтенсивним зростанням кристалів на поверхнях зерен та формуванням ієрархічної структури «частинка в'язучого – новоутворення – невпорядкована периферична область» кластерів. Ці висновки мають універсальний характер і можуть бути застосовані до інших типів мінеральних в'язучих.

В розділі виділено механізми відцентрованого кластероутворення, зумовлені дією структуроутворюючих частинок (наповнювачі або частково прогідратовані частинки в'язучих). Описано два основні механізми. Перший механізм полягає в дії інертних частинок на матеріал під час тужавлення. Встановлено, що для цього необхідне співпадіння фази чутливості матеріалу з первинною зміною структури поблизу границі розділу з частинкою. Це створює умови для поширення деформаційних процесів від центральної частинки до периферії кластеру. Область периферії поблизу границі розділу, перебуваючи під різнонаправленими керуючими впливами, характеризується слабкою впорядкованістю і зменшеними міцностними характеристиками (рис.7). Другий механізм – ріст новоутворень з поверхні частково прогідратованої частинки, що завершується їх контактом з сусідніми елементами. В результаті на периферії кластерів формуються невпорядковані області зі зниженою міцністю. Показано, що при зростанні новоутворень можливе зміщення частинок пасивних складових на периферію області структуроутворення та утворення структури зі зменшеною локальною міцністю. На основі аналізу цих механізмів зроблено висновок про особливості процесів на периферії кластерів, де утворюються області слабкої впорядкованості, що формують мережеву структуру.

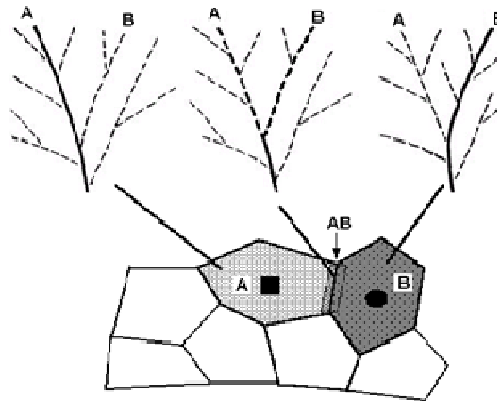


Рис.7. Роль впливів різних структуруючих частинок - А і В, на різні осередки структуроутворення та на їхню границю

Області слабкої впорядкованості утворюють сітку багатогранників, яку в ідеальному випадку можна описати за допомогою розбиття Вороного, побудованого на основі точкових відображень структуруючих частинок. Мережа Вороного утворює розбиття області на багатогранники, кожен з яких включає точки, найближчі до аналізованого центру структуроутворення. Грані поліедрів Вороного відповідають областям неупорядкованості. Береги технологічних тріщин та наступних тріщин руйнування поділяють поліедри. Відповідна мережа границь багатогранників є структурою руйнування. Для матеріалу в тонких шарах відбувається перехід від 3d до 2d – поліедрів, до багатокутників на площині, які легко реконструюються на основі обробки зображень.

Таким чином, при застосуванні віялового багатовекторного підходу до вивчення механізмів багатоосередкового структуроутворення та їх моделювання яскраво проявляються ефекти синергізму – взаємопідсилення ефективності різних методів дослідження. Згідно розробленого підходу вузлові механізми структуроутворення полягають у виникненні стадій чутливості, пов'язаних з динамічною нестабільністю рівномірного розподілу частинок в'язучого тіста. Як результат, утворюється кластерна структура з границями розділу. Цей процес знаходиться під впливом структуруючих частинок різного типу. У підсумку формуються граничні області кластерів зі слабкою впорядкованістю та зменшеною міцністю – елементи структури руйнування.

У **четвертому розділі** дисертації проведено системне феноменологічне дослідження процесів формування структури композитів на основі гіпсу методом кривих структуроутворення. Цей метод заснований на обробці отриманих експериментальних даних дослідження фізичних властивостей матеріалу, таких як швидкість проходження ультразвуку через матеріал, електропровідність, діелектричні втрати, тепловиділення гідратації. Отримані експериментальні криві трансформуються для прояви прихованих особливостей. Перетворення експериментальних кривих здійснюється за кілька етапів: нормування (рис. 8), перехід до графіків кривизни, спільний аналіз особливостей. В результаті аналізу виявляються ефекти часткової синхронізації виникнення особливостей кривих (екстремумів та обігу кривизни в нуль),

виділяються часові смуги синхронізації (рис. 9).

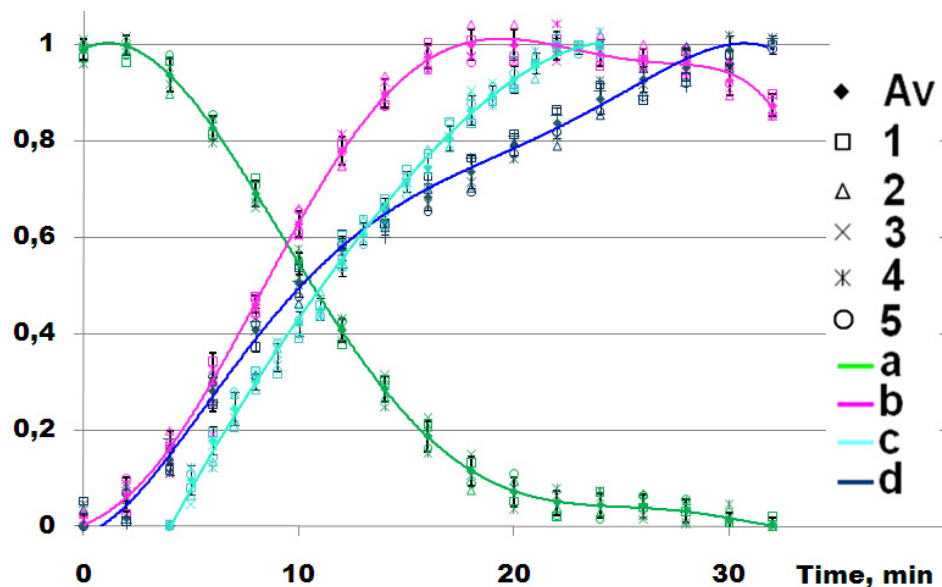


Рис. 8. Усереднені криві структуроутворення гіпсового композиту: 1-5 - номер партії матеріалу; Av – результат усереднення експериментальних даних; а – електропровідність; б – екзотермія; в - швидкість ультразвуку; г - діелектричні втрати

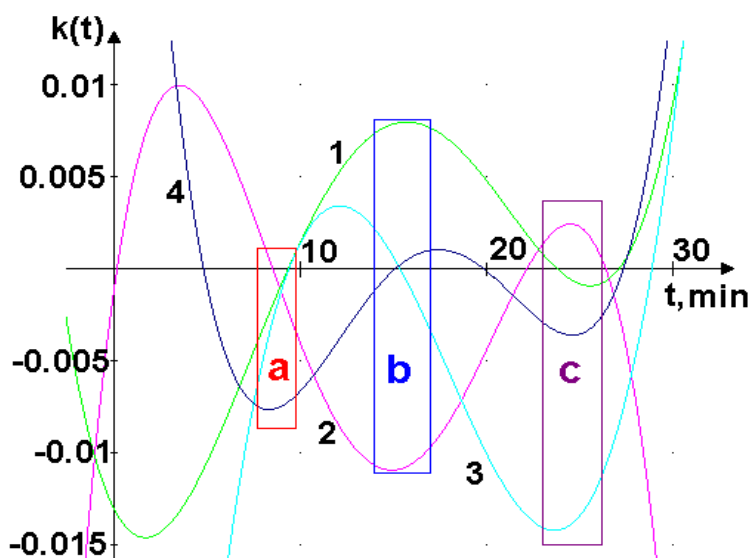


Рис. 9. Значення кривизни експериментальних кривих: 1– електропровідність; 2 – екзотермічний ефект; 3 – швидкість ультразвукових імпульсів; 4— діелектричні втрати; часові інтервали а, б, с – інтервали групування ознак (мінімум, максимум, перетин вісі X)

Виникнення явищ синхронізації можна інтерпретувати як наслідок геометро-топологічної трансформації твердої, рідкої та поверхневої підсистем твердіючого матеріалу. Досліджувані властивості класифікуються на кшталт підсистем, які роблять найбільший внесок у зміни. Ці зміни у процесі структуроутворення інтерпретуються з позицій теорії перколяції. Електропровідність змінюється при розриві перколяційного кластера, що

проводить, з шарів вільної води, яка заповнює капілярно-пористу структуру матеріалу. Вільна вода витрачається на гідратаційні процеси. Зміна швидкості ультразвуку пояснюється утворенням перколяційного кластера твердої фази, що проводить механічні дії та звукові коливання. Передбачається поетапна зміна геометрії такого кластера, що полягає в його обростанні однозв'язаними структурами – «мертвими кінцями». Згодом ці структури трансформуються у дво- та тризв'язані (рис.10).

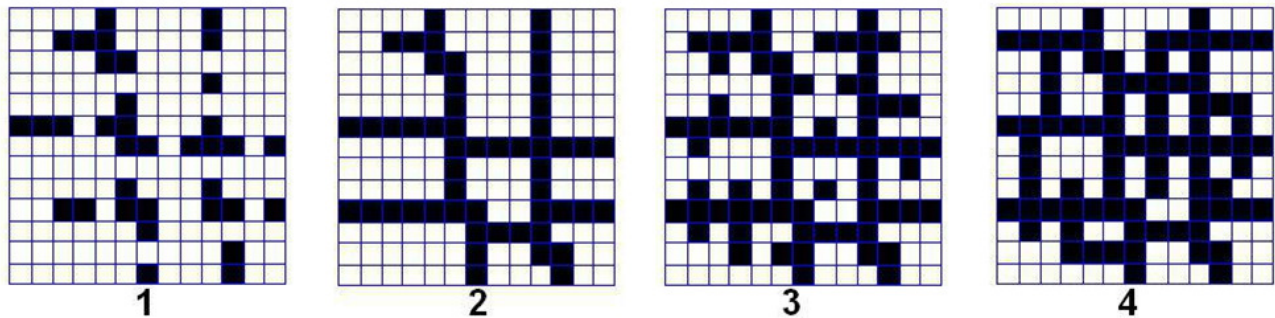


Рис.10. Схема трансформації структури композиційного матеріалу під час твердіння: 1 – початковий період; 2 – утворення провідної структури, початок тужавлення; 3 – період утворення додаткових однозв'язаних фрагментів (*a* на рис. 9); 4 – період трансформації однозв'язаних фрагментів у дво- та тризв'язані фрагментів (*b* на рис. 9)

Таким чином, особливості трансформованих кривих структуроутворення, тобто максимуми, мінімуми та перетини з віссю абсцис, виникають майже синхронно, у вузьких часових інтервалах. Тенденцію до часового угруповання можна спостерігати ще на початку тужавлення композиту. Надалі вона проявляється досить яскраво. Кожен інтервал синхронізації (рис. 9, *a*, *b*, *c*) відповідає структурній перебудові однієї з підсистем – твердої, рідкої чи поверхневої. Такі перебудови мають виражений геометричний та топологічний характер. Незважаючи на те, що ці властивості найбільш істотно залежать від процесів в одній з підсистем, спостерігається часткова синхронізація їх змін, що ефективно простежується методом трансформації експериментальних кривих. Причиною синхронізації є другий аспект системності – всі ці підсистеми займають один і той самий об'єм, структура рідинної фази є індукованою. Таким чином, єдиний темпоритм процесів структуроутворення, що виявляється методами аналізу кривизни, пов'язаний з єдністю займаного об'єму і єдністю матеріальних носіїв відповідних властивостей.

У п'ятому розділі дисертації запропоновано застосування тепловізійних методів дослідження для модельного відображення структуроутворення. Результати тепловізійного дослідження свідчать про утворення квазидискретної структури термічних осередків з майже однаковою температурою, та умовних границь розділу між ними, що приблизно відповідає структурі поліедрів Вороного. Розглядається випадок екзотермічного твердіння композиційного матеріалу на основі гіпсу. У роботі встановлено, що швидкість екзотермічних процесів, зокрема, гетерогенних реакцій, відрізняється у різних

точках препарату в'яжучого тіста. Показано, що це пов'язано з первинною організацією матеріалу у зразку, скупченням твердої фази та багатьма іншими причинами. На основі експериментальних даних, з частковим штучним нівелюванням початкових умов, зроблено висновок, що на швидкість реакції, і, відповідно, тепловиділення, домінуючий вплив чинять дифузійні обмеження. Показано, що тепловізійне дослідження з подальшою обробкою зображення дозволяє виявити багатомасштабну структуру теплових осередків. Встановлено, що деякі з цих осередків обумовлені прискоренням екзотермічних процесів, особливо поблизу поверхні вимірювальної комірки. Підкреслено важливість осередків на проміжному масштабному рівні взаємодії, які формують приблизну сітчасту модель розподілу осередків структуроутворення та меж розділу, де спостерігається підвищена температура (рис.11).



Рис.11. Етапи виділення термічних осередків у будівельному гіпсі Г10, що твердне протягом 2 хв: а – тепловізорне зображення; б – результат виділення границь; в – виявлення теплових комірок методом вододілу; 1 – модель структуроутворюючої частки

Саме ці області, що відповідають межах розділу, можна розглядати як зони підвищеної чутливості до зовнішніх впливів, де відбуваються інтенсивні процеси морфогенезу. Запропоновано використовувати тепловізійні дані для моделювання структур руйнування.

Таким чином, тепловізійні зображення дозволяють візуалізувати та аналізувати структуру, що формується в процесі твердіння, та ідентифікувати зони, де відбуваються найбільш інтенсивні структурні перетворення. Області перепадів температури на межах розділу, що виявлені за допомогою тепловізійного дослідження, корелюють з положенням граней поліедрів Вороного, які відокремлюють області з різною щільністю та складом.

У **шостому розділі** застосовується підхід, заснований на розширенні множини фізичних характеристик композиту до їхніх індивідуальних комбінацій, які тісніше пов'язані зі структурними характеристиками та безпосередніше відбивають цільові характеристики композиту. Ці характеристики можуть слугувати комбінованими критеріями оптимізації будівельних матеріалів, що відображають системні експлуатаційні вимоги до них. Запропоновано використання комбінованих критеріїв, які поєднують

кілька фізико-механічних параметрів і дозволяють проводити багатофакторну оптимізацію. Розроблена класифікація комбінованих критеріїв, що включає структурні, відносні та умовні показники. Структурні критерії описують залежність фізико-механічних властивостей від будови матеріалу, відносні критерії оцінюють баланс між бажаними та небажаними характеристиками, а умовні критерії відображають зміну параметрів у різних умовах експлуатації. Визначено особливу роль комбінованих критеріїв, серед яких значна увага приділена індексу водостійкості. Доведено, що індекс водостійкості є удосконаленим критерієм оцінки довговічності гіпсовмісних матеріалів в умовах вологого середовища. На відміну від традиційного коефіцієнта розм'якшення, який визначається як відношення міцності у водонасиченому стані до міцності у сухому стані, індекс водостійкості додатково враховує абсолютну міцність матеріалу у водонасиченому стані. Дослідження підтвердили, що індекс водостійкості краще корелює з цільовими показниками стійкості в вологому стані та може використовуватися як ключовий критерій при проектуванні водостійких будівельних матеріалів. Оптимізація цього показника дозволяє не лише підвищити стабільність композитів, а й покращити їхні механічні властивості у водонасиченому стані. Для теплоізоляційних матеріалів важливою є мінімізація теплопровідності при збереженні достатньої міцності у вологих умовах. Використання комбінованих критеріїв дозволяє одночасно враховувати ці фактори, що робить їх ефективним інструментом проектування. Показано високу інформативність індексу водостійкості у ЕС-моделях для прогнозування стійкості гіпсових композитів.

Зроблено висновок, що комбіновані критерії, зокрема індекс водостійкості, дозволяють здійснювати більш точне та ефективне проектування будівельних матеріалів та виробів на основі гіпсу. Підтверджено, що вони безпосередньо пов'язані зі структурою матеріалу та його експлуатаційними характеристиками, що робить їх незамінним інструментом у сучасному матеріалознавстві. Використання таких критеріїв забезпечує не лише високу якість гіпсовмісних матеріалів, а також їхню довговічність, що є ключовим фактором у будівництві енергоефективних та надійних конструкцій.

Практичне значення методів проявляється у можливості створенні теплозвукоізолюючих композитів із покращеною водостійкістю. Введений індекс водостійкості дозволив, зокрема, покращити властивості зологіпсоцементного композиту з сумішевим заповнювачем.

Гіпсоцементнозольне в'язуче (ГЦЗВ), як представник гіпсоцементнопуццоланових систем, поєднує властивості будівельного гіпсу, портландцементу та активних алюмосилікатних фаз техногенного походження (золи винесення). Завдяки взаємодії напівгідрату сульфату кальцію з цементними клінкерними фазами та пуццолановими компонентами, у структурі затверділого композиту формується подвійна гідратаційна матриця: кристалічна (на основі $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) та гелева (C-S-H/C-A-S-H). Це забезпечує підвищену щільність, зниження капілярної проникності та стабільність властивостей композиту у вологому середовищі. Пуццоланова активність золи винесення реалізується у вторинних реакціях з гідроксидом кальцію, утвореним

під час гідратації цементу. Це призводить до утворення додаткових зв'язуючих фаз і зменшення лужності порового розчину, що сприяє довговічності. Також зола виносення виступає як мікронаповнювач і центр кристалізації, сприяючи ущільненню мікроструктури. На проміжному масштабному рівні структуроутворення, елементарні механізми подібні до розглянутих.

Введення трикомпонентного заповнювача – пінополістиролу, гранульованого піноскла та пробкової крихти – забезпечує багатофункціональність композиту. Пінополістирол істотно знижує теплопровідність і густину; піноскло, як мінеральний пористий наповнювач, підвищує вогнестійкість і сприяє структурному армуванню; пробка забезпечує ефективне поглинання звукових коливань завдяки своїй клітинчастій будові.

Складено комбінований симплекс-центроїдний план експерименту вигляду «трикутник на відрізку», де трикутники відповідають залежним факторам складу заповнювачів постійного сумарного вмісту, а відрізок – вмісту пуцоланової добавки (зола виносення), всього 14 складів, що містять пінополістирол (X_1), пробкову крихту (X_2), гранульоване піноскло (X_3), а також кількість золи виносення, що визначається золо-цементним відношенням (X_4). Досліджено їх характеристики: середня густина (від 910 до 1240 кг/м³), коефіцієнт теплопровідності (від 0,216 до 0,341 Вт/(м·К)), міцність на стиск (від 5 до 12,1 МПа) та згині (від 0,55 до 1,06 МПа), звукопроникність (від 0,0285 до 0,0471) та інтенсивність ударного шуму (від 0,631 до 1 в нормованій формі), індекс водостійкості (від 1,7 до 5,13). Наприклад, ЕС-модель індексу водостійкості K_v має такий вигляд: $K_v = 2,57X_1 + 2,64X_2 + 4,20X_3 - 3,07X_1X_3 - 0,39X_1X_4 - 2,86X_2X_3 - 0,99X_3X_4$. Створені та відображені графічно ЕС-моделі властивостей матеріалу (рис.12).

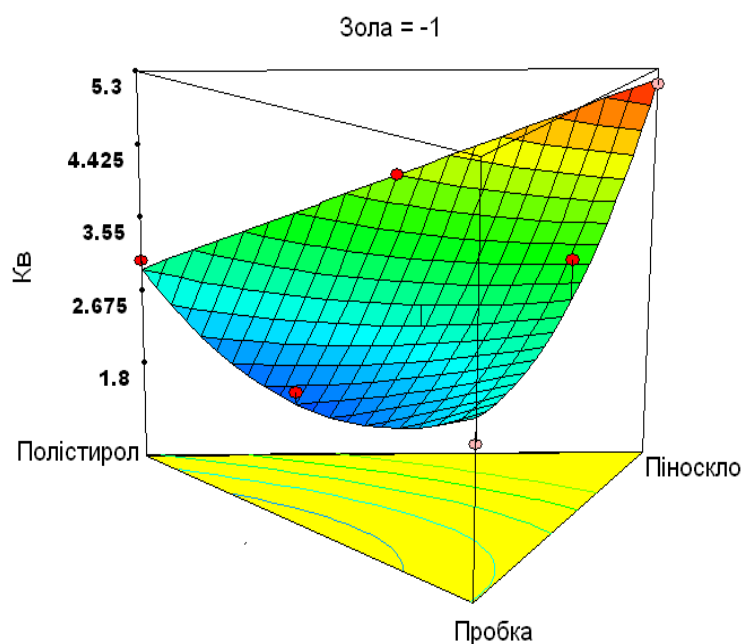


Рис.12. Відображення ЕС-моделей індексу водостійкості композиту у вигляді поверхонь відгуку

Визначені склади, що відповідають допустимим інтервалами властивостей. При мінімальному вмісті золи $X_4 = -1$ область допустимих значень знаходиться всередині сумішевого трикутника і являє собою криволінійний трикутник (рис 13). При вмісті золи $X_4 = 1$ рішень не знайдено.

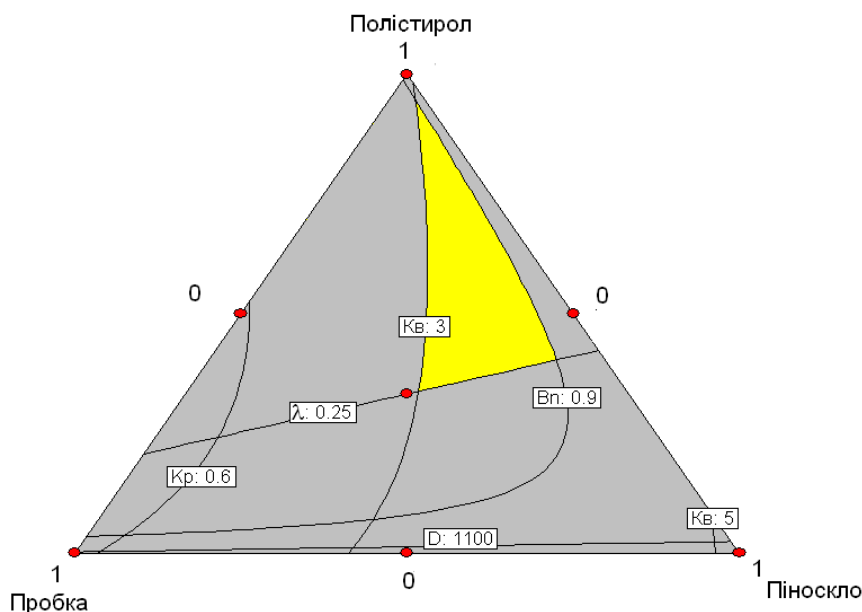


Рис.13. Відображення рекомендованих складів на сумішевому трикутнику при $X_4 = -1$: K_v – індекс водостійкості; K_p – коефіцієнт розм'якшення; B_n – амплітуда ударного шуму; λ – теплопровідність; D – середня густина

Система "ГЦЗВ + три наповнювачі" дозволяє досягти балансу між теплоізоляційними, звукоізоляційними, механічними й екологічними властивостями. Застосування індексу водостійкості як цільового критерію оптимізації дозволило відібрати композиції з компромісно-оптимальним складом композиційного матеріалу на 1 м³: портландцемент ПЦ І 500 - 190,49 кг, гіпс будівельний Г10 - 296,26 кг, зола виносення - 211,60 кг, мікросфери 24,33 кг, вода - 243,29 кг, пластифікатор Coral ExpertSuid-5 - 0,93 кг, уповільнювач Plast retard PE - 0,42 кг, полістирол - 3,94 кг, пробка - 4,86 кг, піноскло - 33,30 кг; з такими властивостями: середня густина - 1010 кг/м³, міцність на стиск 6,05 МПа, міцність на вигин 0,65 МПа, коефіцієнт теплопровідності - 0,24 Вт/(м·К), коефіцієнт звукопроникності 0,033, ударний шум 0,86, коефіцієнт розм'якшення 0,74, індекс водостійкості 3,34.

Введення комбінованих критеріїв дозволяє більш раціонально підходити до вибору матеріалів для специфічних умов експлуатації, таких як підвищена вологість або температурні перепади. Застосування запропонованих підходів також сприяє об'єктивності оцінок та зменшенню впливу суб'єктивних чинників під час проектування складів матеріалів.

Приведені дослідження лягли в основу рекомендацій щодо виготовлення та застосування композицій з покращеними тепло- та звукоізоляційними властивостями. Впровадження розроблених методик в освітні компоненти

дозволило підвищити науковий рівень здобувачів вищої освіти.

Рекомендації щодо практичного застосування запропонованого гіпсового композиту як матеріалу для стяжки підлоги містяться в додатку А. Матеріал було застосовано в трьох об'єктах: житловому приміщенні площею 13,91 м² (ЧП «Практик»), іншому житловому приміщенні площею 54,5 м² (ПП «Русрембуд») та технічному приміщенні під плитку площею 277,18 м² (КП «Будова»). У кожному випадку матеріал укладали шаром 70 мм з урахуванням коефіцієнта запасу 1,2. Документи про впровадження знаходяться в додатку Г.

Економічні показники розраховані в додатках Б, В. Загальна площа укладання склала 345,59 м². Сумарний річний економічний ефект складає 75459 грн. Очікуваний економічний ефект з врахуванням нормативного значення термічного опору склав 218 грн/м², а економічна ефективність (співвідношення вигода/витрати) досягла 3,48. Це свідчить про доцільність застосування розробленого композиту на основі гіпсу для забезпечення комплексу покращених властивостей

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання досліджень були вирішені науково-прикладні завдання, спрямовані на розроблення системного підходу до аналізу і моделювання композиційних матеріалів. Основні наукові та практичні результати узагальнено у таких висновках:

1. У дисертаційній роботі досягнуто поставлену мету – розроблено та аналітично описано механізми багатоосередкового структуроутворення будівельних композитів на основі гіпсу. Встановлено закономірності, що визначають динамічний процес формування структури гіпсових композиційних матеріалів з осередків-кластерів, меж розділу, пор і тріщин. Сформульована концепція морфогенезу структури матеріалу, яка пов'язана з структурними перебудовами в виникаючих завдяки фізико-хімічним процесам на макрорівнях фазах чутливості до структурно-механічних впливів з боку структуроутворюючих частинок. Запропоновано геометричні та динамічні моделі структуроутворення гіпсових композитів, що враховують топологічні трансформації та взаємодію частинок в'язучого і наповнювача на різних масштабних рівнях. Досліджено виникнення структурних зон з пониженими локальними міцнісними характеристиками на периферії кластерних структур, які описані як "структури руйнування". Для дослідження процесів структуроутворення застосовано комплексний підхід, що включає використання тепловізійного аналізу екзотермічних процесів, комп'ютерну обробку зображень та аналіз кривих змін властивостей композитів на основі гіпсу при структуроутворенні, що дозволило ідентифікувати ключові механізми, які впливають на кінцеві властивості композитів. Запропоновані моделі дозволяють більш точно враховувати особливості структури та процесів її формування для створення матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

2. Розроблено системний опис композиційних матеріалів на основі гіпсу на основі простору системних координат і формалізованої теорії систем. Визначено структурні рівні гіпсових композиційних матеріалів та процесів у них, їх класифіковано за ступенем важливості для аналізу структуроутворення. Особливу увагу приділено проміжному рівню взаємодії, який є ключовим для формування структури матеріалу, оскільки він відповідає найбільш активним елементам багатоосередкового структуроутворення.

3. Сформовано уявлення про процеси структуроутворення у гіпсових композитах з позицій топологічних трансформацій. Розглянуто зв'язаність, рід і ступінь зачеплення твердої дисперсної фази та дисперсійного середовища. Еволюційний підхід до аналізу меж розділу матеріалу дозволив уточнити механізми формування цих зон як ключових для структурної інтеграції.

4. Розроблено методику геометродинамічного моделювання гіпсових композиційних матеріалів на основі геометричної параметризації та теорії динамічних систем. Установлено, що динамічні зміни геометричних властивостей матеріалу дозволяють описати процеси структуроутворення, включаючи коливальні режими, які підтверджені експериментально.

5. Запропоновано керовану геометродинамічну градієнтну модель еволюції структури гіпсових матеріалів. Досліджено вплив мікрорівневих процесів, таких як гідратація, на макроструктуру композиційних матеріалів. Розроблено концепцію морфогенезу, яка пояснює вплив фізико-хімічних процесів на стабільність і структуру матеріалу.

6. Досліджено механізми формування кластерів і меж розділу у композиційних матеріалах на основі гіпсу. Встановлено, що межі розділу, сформовані під впливом конкуренції структуроутворюючих частинок, мають знижені локальні характеристики міцності. Описано процес зростання гідратних новоутворень, що починається від центральної частинки та поширюється до периферії кластера. Обґрунтовано застосування мережі багатогранників Вороного для моделювання зон руйнування композиційних матеріалів. Показано, що ці багатогранники є найбільш вірогідними зонами проходження тріщин, оскільки відповідають слабковпорядкованим областям зі зниженими характеристиками міцності.

7. Сформульовано топологічну концепцію трансформацій гіпсових композиційних матеріалів у процесі структуроутворення. Виявлено, що часткова синхронізація структурних змін у підсистемах матеріалу відображає загальні закономірності розвитку структури, що підтверджено аналізом часових кривих зміни властивостей. Запропоновано методику встановлення термінів тужавлення гіпсових композиційних матеріалів на основі фізичних методів, таких як вимірювання швидкості проходження ультразвукових імпульсів через в'язуче тісто, що тужавіє.

8. Розроблено тепловізійний метод дослідження екзотермічних процесів багатоцентрового структуроутворення гіпсових композитів, що дозволив аналізувати ієрархію термічних осередків структуроутворення, придатний для будівельних виробів. Встановлено гетерохронність структуроутворення, вплив стінок комірок на його прискорення, формування

ієрархічної структури термічних осередків, пов'язаної з потенційними зонами руйнування. Тепловізійне дослідження структуроутворення запропоновано як методику, застосовувану для будівельних виробів з гіпсових композитів.

9. Підтверджено доцільність розширення діапазону та різноманітності фізичних характеристик будівельних матеріалів у бік комбінованих властивостей, наприклад індексу водостійкості. Практичний результат розроблених методів полягає у створенні теплозвукоізолюючих композитів з покращеною водостійкістю. Завдяки введеному індексу водостійкості покращено властивості зологіпсоцементного композиту з сумішевим заповнювачем (пінополістирол, коркова крихта, гранульоване піноскло та зола винесення). Побудовано комбінований симплекс-центроїдний план експерименту, досліджено зразки матеріалу та їх характеристики (густина, теплопровідність, міцність, звукопроникність, ударний шум, індекс водостійкості). Отримані ЕС-моделі властивостей, що дало можливість визначити компромісно-оптимальні склади будівельних композицій на основі гіпсу з покращеними теплоізоляційними та звукоізолюючими властивостями.

10. На основі результатів оптимізації композиту на основі гіпсу був розроблений склад з покращеними теплозвукоізолюючими характеристиками. Він був застосований на трьох об'єктах загальною площею 345,6 м². Матеріал використовувався як стяжка в житлових і технічних приміщеннях. В результаті, попри вищу початкову вартість у порівнянні з традиційною цементно-піщаною стяжкою, річний економічний ефект досяг 75 тис. грн. Очікуваний економічний ефект з врахуванням нормативного значення термічного опору склав 218 грн/м², а економічна ефективність (співвідношення вигода/витрати) досягла 3,48. Це свідчить про високу техніко-економічну ефективність матеріалу, зокрема при його застосуванні в енергоефективному будівництві та реконструкції, де тепло- та звукоізоляційні характеристики мають критичне значення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Довгань І.В., Колесников А.В., Семенова С.В. Применение некоторых геометрических методов исследования структурообразования вяжущих веществ. *Вісник ОДАБА*. 2008. Вип. 31. С.137-140. (Структуроутворення в композиційних сумішах досліджується за допомогою геометричної параметризації).

2. Довгань І.В., Колесников А.В., Семенова С.В. Качественные методы триадной теории систем. *Вісник ОДАБА*. 2010. Вип. 39, ч. 1. С. 145–152 (Запропонований варіант теорії систем, що підходить до інтерпретації явищ структуроутворення в матеріалах, як системах).

3. Довгань І.В., Колесников А.В., Семенова С.В., Кириленко Г.А. Описание геометрических свойств дисперсных систем с помощью полинома. *Вісник*

ОДАБА. 2011. Вип. 43. С. 115–119. (Розроблений метод аналізу структури дисперсних систем за допомогою клітинного розбиття).

4. Довгань И.В., Колесников А.В., Семенова С.В., Шарыгин В.М. Выбор модельного объекта для системного материаловедческого исследования. *Вісник ОДАБА*. 2011. Вип. 44. С. 78–85. (З позицій теорії систем, що базується на діалектичних парах, робиться обґрунтований вибір модельного матеріалу для дослідження процесів структуроутворення).

5. Довгань И.В., Колесников А.В., Семенова С.В., Кириленко Г.А. Динамика геометрических свойств и процессов самоорганизации в вяжущих материалах. *Вісник ОДАБА*. 2013. Вип. 48. С. 151–156. (Розглядається динаміка геометричних властивостей композиційних матеріалів, що змінюються в процесі структуроутворення).

6. Довгань И.В., Колесников А.В., Семенова С.В., Шарыгин В.Н. Управление процессами релаксации в композиционных материалах. *Вісник ОДАБА*. 2013. Вип. 48. С. 157–163. (Композиційні матеріали розглядаються з позицій кінетики релаксації стохастичних систем до рівноваги).

7. Керш В., Фощ А., Колесников А. Описание водостойкости гипсосодержащих композиций с помощью комбинированного критерия. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 168. С. 133–139. (За допомогою індексу водостійкості розглядається оптимізація гіпсо-цементно-зольного в'язучого).

8. Довгань И.В., Семенова С.В., Колесников А.В., Дмитренко М.П. Применение динамической теории информации для исследования структурообразования в строительных композитах. *Вісник ОДАБА*. 2017. № 66. С. 59–65. (Трансформація структури будівельних матеріалів розглядається з позицій динамічної теорії інформації).

9. Довгань И.В., Семенова С.В., Колесников А.В., Шарыгин В.Н. Иерархические модели структурообразования в высоконаполненных строительных композитах. *Вісник ОДАБА*. 2017. № 66. С. 59–65. (Розглядаються фізичні моделі виникнення ієрархічної структури композитів).

10. Керш В.Я., Колесников А.В., Гедулян С.И. Статистические характеристики структуры энергосберегающих композитов. *Вісник ОДАБА*. 2018. № 70. С. 81–98. (Розглядаються статистичні характеристики геометричних параметрів порової структури композиту і їх вплив на властивості матеріалу).

11. Керш В., Колесников А., Фощ А., Щербина В. Оценка и оптимизация водостойкости гипсовых композитов. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2019. Вип. 16. С. 14–17. (На основі нових критеріїв водостійкості оптимізується склад високо наповненого гіпсовміщуючого матеріалу).

12. Керш В., Колесников А., Хлицов М., Фощ А. Аналіз структурних станів твердіючого в'язучого по неперервним експериментальним кривим. *Містобудування та територіальне планування*. 2020. Вип. 73. С. 129–139. (Запропоновано алгоритм аналізу кривих структуроутворення).

13. Колесников А.В., Семенова С.В., Выровой В.Н., Керш В.Я. Анализ тепловых эффектов при многоочаговом структурообразовании. *Вісник ОДАБА*.

2021. №85. С.79-88. (Тепловізорним методом і наступною обробкою зображень досліджується структура термічних осередків, що виникає при багатосередковому структуроутворенні).

14. Колесников А.В., Семенова С.В., Казмирчук Н.В., Кириленко Г.А. Исследование структурообразования гипсовых композитов на основе уравнений Колмогорова. *Вісник ОДАБА*. 2020. №78. С.97-107. (Екзотермічний ефект композиту, що твердне, досліджується за допомогою перетвореного рівняння Колмогорова. Зіставлення рівнянь з експериментальними даними дозволяє зробити непрямі висновки щодо структури матеріалу, який формується).

15. Kolesnikov A.V., Semenova S.V., Kirilenko G.A. Phenomenological analysis of the role of geometric features in the formation of the structure and properties of the material. *Вісник ОДАБА*. 2021. № 82. С. 73–81. (За допомогою методів математичного моделювання процес структуроутворення розглядається як такий, що керується геометричними властивостями композиту).

16. Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Oliinyk T.P., Kyrylenko H.A., Makovetskaya E.A. Topological characteristics of the structure of composite materials. *Вісник ОДАБА*. 2022. № 87. С. 65–75. (Досліджуються топологічні риси структури композиційного матеріалу).

17. Колесников А.В., Замула М.О. Системні механізми структуроутворення у багатокомпонентних композиційних матеріалах. *Технічні науки та технології*. 2023. № 3(33). С. 215–226. (Досліджується системний аспект структурних фазових перетворень матеріалу як дисперсної системи, що проявляється як явище синхронізації виникнення особливостей на перетворених кривих структуроутворення).

18. Колесников А.В., Семенова С.В., Маковецька О.О. Моделювання процесів структуроутворення композитів методами теорії катастроф. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2023. № 6. С. 90–98. (Для дослідження структуроутворення запропонований метод структурних потенціалів та його дослідження методом теорії катастроф).

19. Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Vyrovoy V.M., Oliinyk T.P. Building composites as objects of system analysis. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2023. № 3. С. 41–48. (В статті досліджуються теоретико-системні, ймовірнісні та інформаційні аспекти структуроутворення матеріалів при тужавленні).

20. Колесников А.В., Замула М.О. Неруйнівні методи контролю процесів тужавлення і твердіння будівельних композиційних матеріалів із крупним наповнювачем. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2 (32). Р. 397–406. (Розглядаються методи дослідження процесу твердіння композитів за трансформованими кривими структуроутворення).

21. Gara O.A., Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Oliinyk T.P. Optimization of accelerated carbonization hardening effects of expanded clay concrete. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2024. Вип. №8. С.50-64. (Досліджуються моделі структуроутворення у керамзитобетоні при карбонізаційному твердненні)

Статті у виданнях що індексуються в наукометричних базах Scopus, WoS:

22. Kersh V., Kolesnikov A., Hlytsov N., Foshch A. Determination of Transition Stages of Structure Formation by Experimental Data. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. P. 53–58. (Scopus) (Запропонований метод обробки експериментальних даних тужавлення гіпсових композитів на основі рівнянь Колмогорова і Єрофеева).

23. Kersh V., Kolesnikov A., Hlytsov N., Gedulyan S. Thermal and acoustic insulating gypsum composite material with improved water resistance. *Tehnicki glasnik*. 2020. Vol. 14, No. 2. P. 89–93. (WoS) (Розглянуто метод оптимізації тепло- і звукоізоляційних гіпсових композитів за допомогою нового критерію – індексу водостійкості).

24. Kersh V., Kolesnikov A., Khlytsov N., Foshch A. Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 122–127. (Scopus) (Досліджується використання ультразвукового методу для дослідження процесів твердіння гіпсових зв'язуючих).

25. Dovgan I., Kolesnikov A., Semenova S., Zaitseva O. The quantitative characteristics of the microstructure of building composites. *Tehnicki glasnik*. 2016. Vol. 10, No. 3-4. P. 113-116. (WoS) (На основі результатів обробки зображень досліджується геометричні властивості порової структури композитів).

26. Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Oliinyk T.P., Kyrylenko H.A. Quantitative investigation of polymer composites' destruction structures. *Key Engineering Materials*. 2022. 2023. Vol. 2840, Issue 1. 040002 (Scopus) (В статті методом обробки зображень розглядається структура і її статистичні характеристики тріщин срібла (крейзів) в полімерах).

27. Kolesnykov A., Semenova S., Streltsov K., Hedulian S. Spatial Organization of Thermal Processes during Structure Formation of Composite Materials. *Materials Science Forum*. 2024. Vol. 1141. P.53-61. (Scopus) (Екзотермічні процеси, які супроводжують структуроутворення під час тужавлення, досліджуються за допомогою тепловізійної методики та обробкою отриманих зображень)

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

28. Kersh V., Kolesnikov A., Khlytsov N., Foshch A. Generalized optimality criteria of energy-efficient composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162. (Запропонован шлях побудови загального критерію оптимальності енергоефективних матеріалів на основі структурних, відносних та комбінованих).

29. Semenova S.V., Kolesnikov A.B., Kyrylenko G. A., Oliynyk T.P. Analysis of the structure formation processes of building composites by geometric methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1162, 012014. (Запропонований метод моделювання структуроутворення в композитах, що базується на геометричних підходах і теорії градієнтних систем)

30. Kersh V., Kolesnikov A., Gedulyan S., Tverdochleb S. Statistical characteristics of energy-saving composites' structure. *Meridian Ingineresc*. 2017. №

4. Р. 32-36. (За допомогою статистичних методів досліджується порова структура гіпсового композиту. На основі моделі полієдрів Вороного будується геометрична модель порового ансамблю).

Монографія, частина в монографії:

31. Колесников А.В., Семенова С.В., Вировий В.М., Керш В.Я. Методи обробки зображень в задачах будівельного матеріалознавства: монографія. Одеса: ОДАБА, 2024. 200 с. ISBN 978-617-8365-02-8 (Монографія присвячена методам дослідження структури і структуроутворення будівельних композитів за допомогою обробки зображень. Містить загальну інформацію про структуроутворення у будівельних композитах, опис програмно-апаратної складової дослідження, алгоритми і приклади вирішення конкретних завдань, варіанти теоретичних висновків про структуроутворення, що пов'язані з одержаними результатами. Колесников А.В. є співавтором третьої глави та автором п'ятої глави).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

32. Довгань І.В., Колесников А.В. Семенова С.В. Процессы селекционной самоорганизации в структурированных системах минеральных вяжущих. *Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 3-4 квітня 2012 р. Одеса : ОДАБА, 2013. С. 69-72.

33. Довгань І.В., Семенова С.В., Колесников А.В., Дмитренко М.П. Моделирование локальной анизотропии поровой структуры композитного материала. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародного науково-технічного семінару. Одеса : ОДАБА, 2017. С.30-33.

34. Керш В.Я., Колесников А.В., Хлицов М.В. Экспериментально-статистическое моделирование влияния рецептуры гипсосодержащего композита на его пористую структуру. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародного науково-технічного семінару. Одеса : ОДАБА, 2017. С. 42-45.

35. Колесников А.В., Семенова С.В., Кириленко Г.А. Вероятностный метод моделирования структуры строительных композитных материалов. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій* : збірник тез міжнародної конференції. Одеса : ОДАБА, 2018. С.66-71.

36. Керш В. Я., Колесников А.В., Гурш А. И. Исследование процессов структурообразования методом обработки изображений. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій* : збірник тез міжнародної конференції. Одеса : ОДАБА, 2018. С. 58-61.

37. Довгань І.В., Семенова С.В., Колесников А.В. Автокорреляционные методы анализа пространственной организации строительных композитов по их изображениям. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародного науково-технічного семінару. Одеса : ОДАБА, 2018.

С.36-39.

38. Керш В.Я., Колесников А.В., Фош О.В., Хлицов М.В. Теплозвукоизолирующий гипсосодержащий композиционный материал с комбинированным заполнителем. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародного науково-технічного семінару. Одеса : ОДАБА, 2018. С.49-55.

39. Ляшенко Т.В., Керш В.Я., Колесников А.В. Моделирование влияния состава на поровую структуру теплоизоляционного гипсового композита. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародного науково-технічного семінару. Одеса : ОДАБА, 2018. С.94-99.

40. Керш В.Я., Колесников А.В., Хлыцов М.В., Щербина В.С. Ультразвуковой мониторинг процесса схватывания композиций на основе гипса. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій*: збірник тез міжнародної наукової конференції. Одеса : ОДАБА, 2019. С. 90-92.

41. Керш В.Я., Колесников А.В. Комбинированные критерии оптимальности энергосберегающих материалов. *Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології* : матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф., 11-12 грудня 2019 р. Одеса: ОДАБА, 2019. С.117-119.

42. Керш В.Я., Колесников А.В., Фош А.В., Хлыцов Н.В. Определение переходных этапов структурообразования по экспериментальным данным. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доповідей VII наук.- практ. конф., Одеса : ОДАБА, 2020. С.146-150.

43. Керш В.Я., Колесников А.В., Замула М.А. Подбор составов теплозвукоизолирующих композиций. *Енергоефективне місто. XXI століття* : матеріали міжнар. наук.-практ. конференції, 15-16 жовтня 2020 р. Одеса : ОДАБА, 2020. С.39-41.

44. Керш В.Я., Колесников А.В., Ляшенко Т.В., Замула М.А. Моделирование эксплуатационных характеристик теплозвукоизолирующего композита. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів*: матеріали Міжнародного семінару, 3-4 грудня 2020 р. Одеса: ОДАБА, 2020. С.78-85.

45. Керш В.Я., Колесников А.В., Хлицов Н.В. Узагальнені критерії оптимальності енергоефективних композитів. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : збірник тез міжнародної наукової конференції. Одеса: ОДАБА, 2021. С.

46. Семенова С.В., Колесников А.В., Олійник Т.П., Кириленко Г.А. Аналіз процесів структуроутворення будівельних композитів геометричними методами. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : збірник тез міжнародної наукової конференції. Одеса: ОДАБА, 2021. С.

47. Колесников А.В., Семенова С.В., Олійник Т.П., Кириленко Г.А. Кількісне дослідження структур руйнування полімерних композитів. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : матеріали IX Міжнар. наук.- практ. конф., 17–20 травня 2022 р. Одеса: ОДАБА, 2022. С.107-110.

48. Колесников А.В., Семенова С.В., Замула М.А. Динамічний характер

формування експлуатаційних властивостей енергозберігаючих матеріалів. *Енергоефективне місто. XXI століття* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 10-11 листопада 2022 р. Одеса: ОДАБА, 2022. С.34-38.

49. Колесников А.В., Семенова С.В., Дуков І.М. Структурно-динамічні методи моделювання процесів у в'язучих матеріалах. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 17-18 листопада. Одеса: ОДАБА, 2022. С.44-48.

50. Колесников А.В., Семенова С.В., Вировой В.М. Властивості як функція структури будівельних композитів. *Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : збірник тез міжнародної науково-технічної конференції, 27-28 квітня 2023 р. Одеса: ОДАБА, 2023. С.77-80.

51. Семенова С.В., Колесников А. В., Маковецька О.О., Левицький Д.В. Метод потенціалів в теорії структуроутворення. *Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : збірник тез міжнародної науково-технічної конференції, 27-28 квітня 2023 р. Одеса : ОДАБА, 2023. С.130-133.

52. Семенова С.В., Колесников А.В. Геометричні характеристики та фізична природа структур руйнування композиційних матеріалів. *Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : збірник тез міжнародної науково-технічної конференції, 23 квітня 2024 р. Одеса: ОДАБА, 2024. С.125-128.

АНОТАЦІЯ

Колесников А.В. Механізми багатоосередкового структуроутворення будівельних композитів на основі гіпсу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2025.

Дисертація присвячена розробці теоретико-експериментальних моделей багатоосередкового структуроутворення будівельних композитів на основі гіпсу та їх використанню для оптимізації властивостей матеріалу в умовах експлуатації. В основу покладено гіпотезу про активну роль самоорганізації завдяки взаємодії макро- та мікроструктури композиту як складної відкритої динамічної системи. Головна концепція роботи полягає в керуванні розвитком структури та властивостей матеріалу через розуміння еволюції структури як системи, що самоорганізується за рахунок зміни характеру поверхневих шарів частинок, перерозподілу частинок, утворення та трансформації границь розділу, мінімізації поверхневої енергії та реалізації нестабільностей.

Для аналізу матеріалу як складної відкритої ієрархічної системи використовується теоретико-системний підхід, що дозволяє розглядати матеріал через систему координат діалектичних протилежностей. Такий підхід допомагає виявити зв'язок між зародкоутворенням і кластеризацією, а також

трактувати структуроутворення як інформаційне перетворення. Визначено, що ключову роль в виникненні нових структурних рис у матеріалі відіграє проміжний рівень взаємодії.

Розроблено топологічний підхід до структуроутворення гіпсових композитів, що базується на вивченні зміни топологічних характеристик, таких як зв'язаність, рід і зачепленість. Аналіз структури здійснюється методом фізико-геометричної параметризації, що відображає частки елементів твердої фази на геометричний простір. Динаміка структурних змін розглядається в геометричному просторі. Колювання у структуроутворенні відображають динаміку тверднення, що виникає через зміну балансу утворення та руйнування структурних елементів.

Запропоновано метод моделювання багатосередкового структуроутворення композитів на основі гіпсу на основі динаміки керованих градієнтних систем та метод структурного потенціалу у вигляді поліному, змінні якого відповідають вмісту елементів структури. Останній розширено на дослідження в контексті теорії катастроф, аналізується взаємодія макро- та мікрорівневих явищ. Аналіз моделей виявляє ключову роль керуючих параметрів, зміна яких викликає як поступові, так і дискретні перетворення структури.

Аналіз моделей структуроутворення на основі структурного потенціалу виявляє ключову роль керуючих параметрів, зміна яких викликає як поступові, так і дискретні (катастрофічні) перетворення структури. Важливим аспектом є наявність впливу, що керує процесами структуроутворення безпосередньо зсередини матеріалу. При гідратаційному твердінні гіпсових композитів, утворення продуктів гідратації на поверхні частинок змінює міжчастинковий потенціал, що спричиняє втрату ізотропності та рівномірності просторового розподілу частинок. Це перетворення тлумачиться як наслідок зміни форми структурного потенціалу, що впливає на фізико-геометричні характеристики матеріалу, густину частинок і зв'язків. Процес структуроутворення, або морфогенезу, супроводжується одночасною зміною хімічних параметрів, потенціалу та стану геометродинамічної системи. Біля точок біфуркації градієнтної геометродинамічної системи чутливості матеріалу до механічних і хімічних впливів досягає максимуму. У цих точках визначається подальший сценарій розвитку структури, що реалізується за принципом «від досягнутого».

Серед механізмів багатоосередкового структуроутворення гіпсових композитів на проміжному рівні виділено відцентрове кластероутворення, зумовлене впливом структуроутворюючих частинок, таких як наповнювачі або зерна частково прогідратованих в'язучих матеріалів (гіпсу). Один із ключових механізмів – дія інертних структуроутворюючих частинок під час тужавлення. Він реалізується за умови збігу фази чутливості гіпсового композиційного матеріалу, що виникає при його диференціації, з первинними структурними змінами поблизу границі розділу з частинкою. Це створює умови для поширення деформаційних процесів та структурних перетворень на певну відстань від частинки. Структуроутворююча частинка порушує симетрію структурних станів, що можна описати як локальне ущільнення або

розрідження, і спрямовує морфогенез уздовж одного з перерізів морфогенетичного ландшафту.

Ще одним механізмом кластероутворення гіпсових композитів, який підтверджується як мікроскопічними дослідженнями, так і аналізом кінетики структуроутворення, є відцентровий ріст новоутворень з поверхні частково прогідратованих зерен в'язучого. У цьому випадку новоутворення ростуть від поверхні зерна і, досягнувши сусідніх частинок, контактують із аналогічними елементами, що формуються з інших зерен. Внаслідок такої взаємодії у матеріалі виникають неупорядковані області, що нагадують межі розділу фаз і характеризуються зниженою міцністю. При просуванні фронту росту новоутворень можливе витіснення пасивних частинок (наприклад, зерен наповнювача) на периферію області структуроутворення, де вони формують ущільнену структуру. Накопичення зерен наповнювача між сусідніми кластерами може спричинити локальне зниження міцності. Ці зони слабкої впорядкованості, що виникають внаслідок кластероутворення, можуть стати зародками тріщин та руйнування. Внаслідок впливу обох видів від структуроутворюючих частинок поширюється фронт структуроутворення - зростає область, заповнена матеріалом певної структурної організації. Гранична зона, що знаходиться під різнонаправленими впливами, характеризується слабкою впорядкованістю і високою концентрацією пасивних частинок. Області слабкої впорядкованості в зразку, що формується, утворюють мережеву структуру. В ідеальному випадку, коли структуроутворення відбувається в еквівалентних умовах, правдоподібною моделлю такої мережі є розбиття Вороного, побудоване на основі структуроутворюючих частинок обох видів. Грані поліедрів Вороного (точніше, об'єм навколо них) відповідають розглянутим вище областям неупорядкованості. Береги технологічних тріщин та наступних тріщин руйнування поділяють поліедри та відокремлюють їх один від одного. Такі властивості дозволяють назвати відповідну мережу границь багатогранників структурою руйнування.

Ефективним інструментом для моделювання структури руйнування в гіпсових композитах є тепловізійні методи, що дозволяють візуалізувально змодельовати структуру руйнування. Тепловізійне дослідження фіксує неоднорідності твердої фази, дифузійні обмеження та локальні варіації структури, відображаючи ділянки прискореного тепловиділення як області підвищеної температури. Виявляються осередки проміжного масштабного рівня, що формують сітчасту модель розподілу зон структуроутворення та меж розділу.

Часова структура процесів структуроутворення в гіпсових композитах виявляється через аналіз кривих змін фізичних властивостей матеріалу з часом, таких як швидкість проходження ультразвуку, електропровідність, діелектричні втрати та тепловиділення гідратації. Запропонований метод аналізу передбачає трансформацію експериментальних кривих, що включає нормування, побудову графіків кривизни та спільний аналіз особливостей. Виявлено ефекти часткової синхронізації екстремумів і точок нульової кривизни, що дозволяє виділити часові смуги синхронізації. Це явище пояснюється геометро-топологічними

трансформаціями твердої, рідкої та поверхневої підсистем гіпсових композитів, що тверднуть.

Запропоновано підхід, що базується на розширенні множини фізичних характеристик гіпсових композитів до їхніх індивідуальних комбінацій, що тісніше пов'язані зі структурними параметрами матеріалу та безпосередніше відбивають його цільові властивості. Такі характеристики можуть слугувати комбінованими критеріями оптимізації будівельних матеріалів, відображаючи системні експлуатаційні вимоги. Запропоновано використання багатofакторних критеріїв, що поєднують кілька фізико-механічних параметрів, дозволяючи проводити комплексну оцінку та цілеспрямовану оптимізацію. Розроблена класифікація комбінованих критеріїв, що включає структурні, відносні та умовні показники. Структурні критерії описують взаємозв'язок фізико-механічних властивостей із будовою матеріалу, відносні враховують баланс між бажаними та небажаними характеристиками, а умовні відображають зміну параметрів у різних умовах експлуатації. Особлива увага приділена індексу водостійкості, який є удосконаленим критерієм довговічності гіпсовмісних матеріалів у вологому середовищі. Використання індексу водостійкості як комбінованого критерію оптимізації дозволило отримати компромісно-оптимальний теплозвукоізолюючий композит складу (на 1 м³: портландцемент ПЦ І 500 - 190,49 кг, гіпс будівельний Г10 - 296,26 кг, зола виносення - 211,60 кг, мікросфери 24,33 кг, вода - 243,29 кг, пластифікатор Coral ExpertSuid-5 - 0,93 кг, уповільнювач Plast retard PE - 0,42 кг, полістирол - 3,94 кг, пробка - 4,86 кг, піноскло - 33,30 кг; з такими властивостями: середня густина - 1010 кг/м³, міцність на стиск 6,05 МПа, міцність на вигин 0,65 МПа, коефіцієнт теплопровідності - 0,24 Вт/(м·К), коефіцієнт звукопроникності 0,033, ударний шум 0,86, коефіцієнт розм'якшення 0,74, індекс водостійкості 3,34. Композиційний теплоізоляційний матеріал було застосовано у вигляді стяжки, загальна площа укладання склала 345,59 м². Сумарний річний економічний ефект складає 75 тис. грн. Очікуваний економічний ефект з врахуванням нормативного значення термічного опору склав 218 грн/м², а економічна ефективність (співвідношення вигода/витрати) досягла 3,48.

Ключові слова: гіпс, композити, система, структура, динаміка, геометричні особливості, моделювання, кластероутворення, руйнування, поверхні розділу, поліедри, топологія, самоорганізація, синхронізація.

ABSTRACT

Kolesnikov A.V. Mechanisms of Multicenter Structure Formation of Gypsum-Based Building Composites. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23.05 – Building Materials and Products. – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 2025.

The dissertation is devoted to the development of theoretical and experimental models for multicenter structure formation in gypsum-based building composites and

their application for optimizing material properties under operational conditions. The study is grounded on the hypothesis that self-organization, driven by the interaction between macro- and microstructure in the composite as a complex open dynamic system, plays an active role. The core concept of the work lies in controlling the development of the material's structure and properties by understanding structural evolution as a self-organizing system, driven by changes in surface layer characteristics of particles, particle redistribution, formation and transformation of phase boundaries, minimization of surface energy, and the realization of instabilities.

A systems-theoretic approach is employed to analyze the material as a complex open hierarchical system, allowing it to be interpreted through a coordinate system of dialectical opposites. This approach reveals the relationship between nucleation and clustering, interpreting structure formation as an information transformation. It is determined that the intermediate interaction level plays a key role in the emergence of new structural features in the material.

A topological approach to structure formation in gypsum composites is developed, based on the study of topological characteristics such as connectivity, genus, and entanglement. Structural analysis is conducted using a physico-geometric parameterization method, which maps elements of the solid phase onto geometric space. The dynamics of structural changes are examined in geometric space. Oscillations in structure formation reflect the dynamics of hardening, resulting from the balance between formation and destruction of structural elements.

A method for modeling multicenter structure formation in gypsum-based composites is proposed, based on the dynamics of controlled gradient systems and the structural potential method, expressed as a polynomial whose variables correspond to the content of structural elements. This model is extended within the framework of catastrophe theory to analyze macro- and micro-level interactions. The model analysis reveals the key role of control parameters, whose variation leads to both gradual and discrete structural transformations.

The structural potential-based models highlight the influence of internal drivers that govern structure formation from within the material. During the hydration hardening of gypsum composites, the formation of hydration products on particle surfaces alters interparticle potential, resulting in the loss of isotropy and uniform spatial distribution of particles. This transformation is interpreted as a consequence of the structural potential's shape change, influencing the material's physico-geometric characteristics, particle density, and connectivity. The structure formation process, or morphogenesis, is accompanied by simultaneous changes in chemical parameters, potential, and the state of the geomicrodynamic system. Near bifurcation points of the gradient geomicrodynamic system, the material's sensitivity to mechanical and chemical influences reaches its peak. These points determine the subsequent scenario of structure development, realized according to the "from the attained" principle.

Among the mechanisms of multicenter structure formation at the intermediate level, centrifugal cluster formation, induced by structure-directing particles such as fillers or partially hydrated binder grains (gypsum), is identified. A key mechanism involves the influence of inert structure-directing particles during setting. This mechanism is activated when the sensitivity phase of the gypsum composite, which

arises during its differentiation, coincides with primary structural changes near the particle boundary. This enables the propagation of deformation processes and structural transformations away from the particle. The structure-directing particle disrupts symmetry in structural states, which can be described as local densification or rarefaction, directing morphogenesis along a specific section of the morphogenetic landscape.

Another confirmed clustering mechanism, supported by both microscopic observations and kinetic analysis, is centrifugal growth of new formations from the surface of partially hydrated binder grains. In this case, new formations grow outward from the grain surface and, upon reaching adjacent particles, interact with similar elements forming from other grains. This interaction leads to the development of disordered regions resembling phase boundaries and characterized by reduced strength. As the growth front progresses, passive particles (e.g., filler grains) may be pushed to the periphery of the structure-forming zone, forming a denser structure. Accumulation of filler grains between neighboring clusters may cause local weakening. These weakly ordered zones may act as crack initiation sites. The structure formation front expands under the influence of both types of structure-directing particles, creating a region with a distinct structural organization. The boundary zone, subjected to conflicting influences, is weakly ordered and contains a high concentration of passive particles. In the forming specimen, these weakly ordered areas constitute a network structure. Ideally, if structure formation occurs under equivalent conditions, the network can be modeled as a Voronoi tessellation based on the structure-directing particles. The polyhedral faces (or surrounding volumes) of the Voronoi diagram correspond to the aforementioned disordered zones. The edges of technological and failure-induced cracks divide and separate the polyhedra, allowing the network of polyhedral boundaries to be defined as a fracture structure.

Thermal imaging methods serve as an effective tool for modeling the fracture structure in gypsum composites, enabling visual simulation of damage networks. Thermographic studies reveal solid-phase inhomogeneities, diffusion limitations, and local structural variations, highlighting zones of accelerated heat release as high-temperature regions. Intermediate-scale centers emerge, forming a mesh-like distribution model of structure formation zones and phase boundaries.

The temporal structure of structure formation in gypsum composites is revealed through analysis of time-dependent changes in material properties such as ultrasound velocity, electrical conductivity, dielectric loss, and hydration heat release. The proposed analysis method involves transforming experimental curves through normalization, curvature plotting, and combined feature analysis. Effects of partial synchronization of extrema and zero curvature points are identified, allowing temporal synchronization bands to be delineated. This phenomenon is attributed to geomicro-topological transformations within the solid, liquid, and surface subsystems of hardening gypsum composites.

An approach is proposed to extend the set of physical characteristics of gypsum composites to include individualized combinations more closely related to structural parameters and more directly reflecting targeted properties. These characteristics may

serve as combined optimization criteria for building materials, reflecting systemic performance requirements. The use of multifactorial criteria, integrating several physico-mechanical parameters, enables comprehensive evaluation and goal-directed optimization. A classification of combined criteria is developed, including structural, relative, and conditional indicators. Structural criteria describe the relationship between physico-mechanical properties and material structure, relative criteria account for the balance between desirable and undesirable properties, and conditional criteria reflect parameter changes under different operating conditions. Particular attention is given to the water resistance index, which serves as an advanced durability criterion for gypsum-containing materials in humid environments. Applying this index as a combined optimization criterion enabled the development of a compromise-optimized thermal and acoustic insulating composite with the following composition per 1 m³: Portland cement PC I 500 – 190,49 kg, building gypsum G10 – 296,26 kg, fly ash – 211,60 kg, microspheres – 24,33 kg, water – 243,29 kg, plasticizer Coral ExpertSuid-5 – 0,93 kg, setting retarder Plast retard PE – 0,42 kg, polystyrene – 3,94 kg, cork – 4,86 kg, foam glass – 33,30 kg; with properties as follows: average density – 1010 kg/m³, compressive strength – 6,05 MPa, flexural strength – 0,65 MPa, thermal conductivity – 0,24 W/(m·K), sound transmission coefficient – 0,033, impact noise – 0,86, softening coefficient – 0,74, and water resistance index – 3,34. The composite thermal insulation material was applied as a screed, the total area of application was 345.59 m². The total annual economic benefit amounts to 75 thousand UAH. The expected economic effect, taking into account the normative value of thermal resistance, was 218 UAH/m², and the economic efficiency (Benefit/Cost Ratio) reached 3,48.

Keywords: gypsum, composites, system, structure, dynamics, geometric features, modeling, clustering, failure, interfaces, polyhedra, topology, self-organization, synchronization.