

Андрій Колесников¹, Михайло Замула²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: kolesnikov_himek@ogasa.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>, ResearcherID: [IRZ-3809-2023](https://orcid.org/IRZ-3809-2023)

²здобувач ступеня доктора філософії, аспірант кафедри міського будівництва та господарства

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: zamulamichailodaba@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0029-3758>, ResearcherID: [IRZ-3909-2023](https://orcid.org/IRZ-3909-2023)

НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСІВ ТУЖАВЛЕННЯ І ТВЕРДІННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ КРУПНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

У статті розглянуто проблему неруйнівного контролю процесів тужавлення та твердіння композиційних матеріалів з крупним заповнювачем, де використання пенетраційних методів неможливе й робити висновки про стадії процесів тужавлення можливо лише за непрямыми ознаками. Наведено порівняльну характеристику неруйнівних методів, заснованих на вимірі електричних властивостей, на дослідженні екзотермічних процесів і, відповідно, швидкості поширення ультразвукових імпульсів у в'язучому тісті. Показано, що за основний метод, зручно прийняти ультразвуковий, що дозволяє ефективно відобразити як початок, так і кінець тужавлення.

Ключові слова: неруйнівний контроль, терміни тужавлення, швидкість ультразвуку.

Рис.: 9. Табл. 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Розглянута задача є актуальною, оскільки стандартизована пенетраційна методика дослідження багатьох матеріалів із великими частинками наповнювача (і заповнювача) як на основі модифікованих гіпсових в'язучих, так і на основі цементу, не спрацьовує і повинна бути або принципово модифікована або замінена непрямыми методами, застосовними як основа для експрес-методів контролю твердіння зразків і конструкцій у будівельній практиці.

Новизна опублікованого матеріалу полягає в розроблених методиках вимірювання, пристосованих до завдань будівельного матеріалознавства, в елементах порівняльної структурно-орієнтованої інтерпретації отриманих результатів, у переході від результатів фізичних вимірювань до шкали термінів тужавлення.

Об'єктом дослідження є енергоефективний композиційний матеріал підвищеної водостійкості на гіпсовій основі з комбінованим крупнозернистим наповнювачем. Предметом дослідження є можливість визначення термінів тужавлення щодо зміни фізичних властивостей матеріалу.

Постановка проблеми. Одним із напрямів будівельного матеріалознавства є розвиток науки про композиційні матеріали в теоретичному та прикладному напрямку. Перспективним напрямком є використання багатокомпонентних сумішей, як матричного матеріалу, так і в ролі наповнювачів. Зокрема, як композиційні матеріали для основ під підлогу зручно використовувати композиційний матеріал на основі гіпсового матричного матеріалу з посиленою водостійкістю та суміші наповнювачів, кожен з яких забезпечує посилення одного з важливих для цільового використання композиту властивості – теплоізоляційного або звукоізоляційного [1] (рис. 1). При використанні відповідного композиційного матеріалу важливим завданням є підбір такого складу, який би забезпечував можливість практичної роботи з ним – укладання та формування.

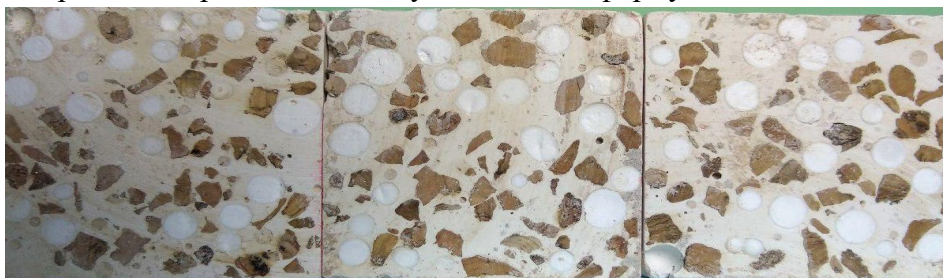


Рис. 1. Приклад структури багатокомпонентного матеріалу з крупним наповнювачем

Контролювати відповідні властивості в разі композиту середньої та високої наповненості досить важко, оскільки пенетраційні методи не спрацьовують – індентори пенетраційних приладів стандартизованих методів (голка Віка, пластометр) блокуються частинками наповнювача. Таким чином, для вимірювання термінів тужавлення (ПТ - початку тужавлення, КТ - кінця тужавлення) необхідно або суттєво змінити масштаби вимірювальної установки (щоб локальні структурно-механічні властивості композиту «усереднювалися» у разі індентора значних розмірів), або переходити до непрямих вимірів. Слід зазначити також, що непрямі вимірювання можуть надати додаткову інформацію про стан композиту, що твердне. У роботі розглядаються другий шлях дослідження, із широкого арсеналу непрямих методів обрані такі, які порушують структуру композиту, що твердне, найменшим чином.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі структуроутворення в мінеральних в'язучих та композитах на їх основі відбуваються фізико-хімічні зміни, що характеризуються різними просторовими масштабами. Змінюються багато фізичних властивостей в'язучого тіста, прямо чи опосередковано пов'язані зі структурою – міцність, в'язкість, пластична міцність, температура, швидкість поширення звукових та ультразвукових коливань, електричні характеристики [2]. Усі наведені характеристики можуть бути використані як індикаторні для визначення термінів тужавлення, при цьому ряд властивостей відображають зміни станів в'язучого тіста більш яскраво й контрастно.

Для визначення термінів тужавлення використовують непрямі методи віскозиметрії, вимірювання електричних характеристик та швидкості проходження ультразвукових коливань [3]. Реалізація цих методів в інженерній практиці потребує вирішення проблеми надійної ідентифікації термінів тужавлення за експериментальними результатами. Один із найбільш перспективних методів контролю термінів тужавлення композитів з частинками заповнювача [4] заснований на вимірі швидкості ультразвуку.

Інтерес представляє порівняння кількох методів оцінки стану композиційного в'язучого тіста, що твердне, з метою визначення термінів тужавлення та особливостей режимів формування та обробки матеріалів досліджуваної групи.

Виділення не досліджених раніше частин загальної проблеми. Попередній аналіз інформаційних джерел дозволив виявити деякі проблеми щодо визначення термінів тужавлення в наповнених композиційних матеріалах:

1. Терміни тужавлення, що є умовними величинами, недостатньо чітко пов'язуються зі структурними змінами в матеріалі під час тужавлення.
2. Невизначені процедури вимірювання термінів тужавлення для високо наповнених композитів.
3. Недостатньо розроблені непрямі методи визначення строків тужавлення та твердіння матеріалу у формі зразків та виробів.
4. Недостатньо розроблений порівняльний аналіз змін структурних властивостей композитів під час тужавлення та його фізичних характеристик.

Мета статті. Метою роботи є порівняння непрямих неруйнівних методів контролю процесів структуроутворення композитів як із практичних позицій діагностики стану в'язучого тіста та визначення термінів тужавлення, так і з теоретичного погляду для змістовної інтерпретації процесів структуроутворення композиційного в'язучого тіста. Відповідними завданнями є:

1. Короткий розгляд апаратного оформлення, методик вимірювання, характерних особливостей одержуваних результатів у формі кривих структуроутворення для композитів на основі гіпсу.
2. Структурно орієнтована інтерпретація даних, одержуваних для модельних сумішей та композиційних матеріалів.

3. Порівняння наведених методів неруйнівного контролю, їх інформативності та переважної сфери застосування.

4. Вибір одного з методів як основного, опорного для практичного дослідження процесів структуроутворення та визначення термінів тужавлення матеріалів цільової категорії, що розглядається, та їм подібних.

Виклад основного матеріалу. Нижче розглянуто деякі спрощені за експериментальним оформленням методи дослідження композиційного в'язучого тіста – термічний, два електричних – дослідження зміни електропровідності та діелектричних втрат, та ультразвуковий, заснований на вимірі швидкості проходження ультразвукових імпульсів через в'язуче тісто, що твердіє.

Тепловиділення вимірювалося на основі стандартизованої методики [5] за допомогою калориметра для в'язучих речовин на основі хормель-копелевих термопар (рис. 2), що являють собою різновид діатермічного калориметра [6].

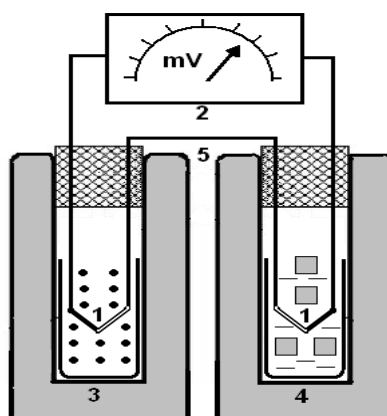


Рис. 2. Калориметр для дослідження екзотермічних ефектів твердіння в'язучих та композитів:

- 1 – диференціальна термопара; 2 – потенціометр; 3 – ємність з в'язучим тістом;
4 – ємність порівняння з водокрижаною сумішшю ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$);
5 – ємності з теплоізоляційного матеріалу (пінополістиролу) з пробками

Основним елементом установки для дослідження діелектричних втрат у в'язучому матеріалі був електронний діелькометр-вологомір ВЕБ-3, вихідне призначення якого – вимірювання вологості деревини різних сортів відповідно до калібрувальних графіків. Вологомір є малопотужним генератором високої частоти. Сила струму, що протікає через мікроамперметр, та його показання, знаходяться у відомій функціональній залежності від вологості випробуваного матеріалу.

Електропровідність композитної суміші вимірювалася на змінному струмі, щоб уникнути поляризації електродів, методом амперметра та вольтметра за допомогою установки, схема якої показана на рисунку 3.

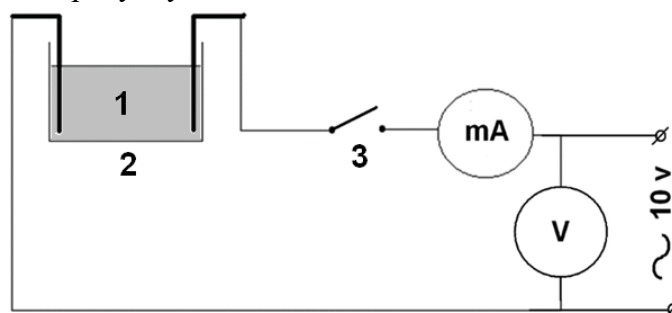


Рис. 3. Схема вимірювання електропровідності матеріалу:

- 1 – суміш, що досліджується, 2 – комірка для вимірювання, 3 – електричний ключ

На вхід за допомогою стандартного блоку живлення подавалася стабілізована змінна напруга частотою 50 Гц. Для вимірювання були сконструйовані та використані кілька варіантів комірок: циліндрична з двома мідними пуансонами, прямокутна, плоска та коміррка з рухомим електродом. Деякі конструкції комірок показані на рисунку 4. При дослідженні матеріал електрода вважався інертним.

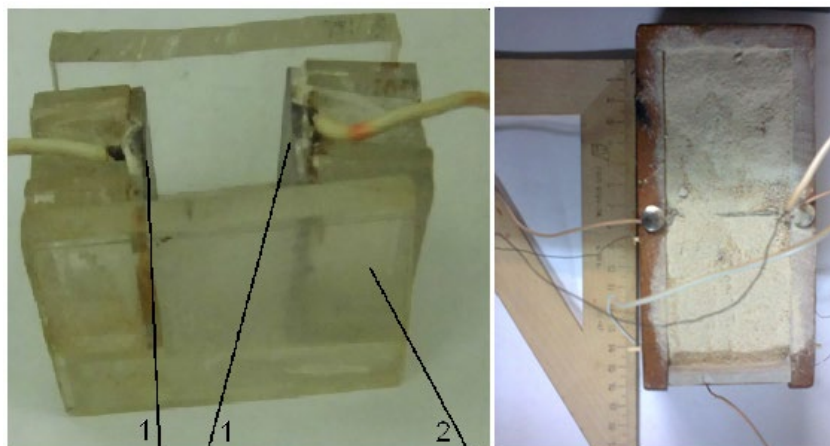


Рис. 4. Конструкції вимірювальних комірок:
1 – електроди; 2 – корпус

На підставі вимірювань обчислювалася питома електропровідність (сименс на метр) композиту за формулою (1):

$$\sigma = G \frac{L}{S} = \frac{I L}{U S}, \tag{1}$$

де L – довжина провідного об’єму, S – площа його перерізу, I, U – показання амперметра і вольтметра відповідно [7].

Вимірювальна установка для ультразвукового дослідження складається з п’єзоелектричних перетворювачів (передавача та приймача), контейнера для зразків, наповненого композиційним в’язучим тістом на основі гіпсу, приладів для ультразвукового контролю конструкцій УК-10ПМС або УК-14П. У ході випробування згенерований ультразвуковий імпульс пропускатється через матеріал (рис. 5).



Рис. 5. Ультразвукова установка (а)
та ультразвукові прилади УК-10ПМС та УК-14П (відповідно b, c)

Вимірюється час проходження ультразвукового імпульсу через композиційний матеріал з макроскопічними неоднорідностями 5-10 мм зернами і гранулами заповнювача, що забезпечують високі тепло- і звукоізоляційні властивості. Результати вимірювань відображаються у вигляді кривих зміни часу проходження ультразвукових імпульсів та розрахункової швидкості ультразвуку в процесі структуроутворення в’язучого або композиту на його основі.

Результати дослідження та їх інтерпретація. Для якісного зіставлення результатів вимірювання фізичних властивостей був обраний типовий за фізичними характеристиками варіант композиційного складу, виконано нормуюче перетворення кожної з величин – діелектричних втрат, екзотермічного ефекту, електропровідності та швидкості ультразвукових імпульсів, згідно із загальним співвідношенням (2):

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (2)$$

Отримані величини з метою зіставлення розміщувалися на одному графіку (рис. 6). Послідовна інтерпретація отриманих залежностей суттєво полегшує перехід до цільових величин – термінів тужавлення композиційного в'язучого.

Типові нормовані характеристики композиційного в'язучого, що твердне

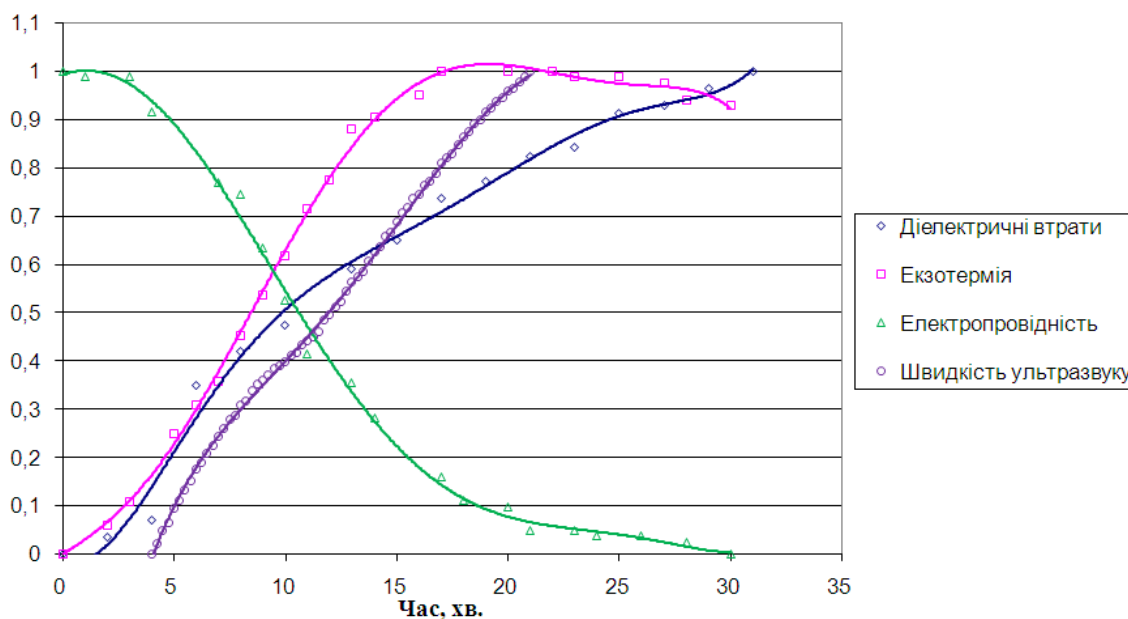


Рис. 6. Порівняльний графік фізичних властивостей композиційного в'язучого тіста, що твердіє

Зміна діелектричних втрат. Оскільки йдеться про вимірювання на високих частотах (~ 100 КГц), внесок у значення діелектричних втрат, пов'язаної з втратою потужності у в'язучому тісті, меншою мірою обумовлений явищами провідності за рахунок вільного руху іонів, більшою мірою – за рахунок конформаційних змін структури адсорбційних шарів частинок, що знаходяться у в'язучому тісті, а також руйнування та утворення водневих зв'язків. Можна запропонувати досить грубу модель – діелектричні втрати та перебіг їх змін обумовлений головним чином станом молекул води. Тоді процес зміни діелектричних втрат із часом можна розглянути, як двостадійний процес. На першому етапі вільна вода переходить у зв'язану адсорбовану на межах розділу частково гідратованого мінерального компонента (рис. 6, 0-10 хв). Водночас відбувається гідратація в'язучого з переважанням топохімічної реакції. У точці зламу (рис. 6, 10 хв) переважна більшість води залишається в адсорбованій формі, далі відбувається процес гідратації всередині зерен в'язучого. Усі ці процеси відбуваються всередині капілярно-пористої структури матеріалу, що сформувалася. У точці зламу (10 хв) відбувається часткове завершення гідратації гіпсу, у реакцію вступають мінерали цементного каменю та пуцоланічна добавка.

Таким чином, завдяки зростанню ефективної в'язкості та формуванню водневих зв'язків з атомами кисню молекули води зв'язуються з мінеральними компонентами міцніше, конформаційні зміни і трансформація скелета водневих зв'язків відбуваються більш

важко, вони «не встигають» за змінами електричного поля, в результаті чого зростає величина діелектричних втрат. Схематична інтерпретація описаних вище процесів структуроутворення показано на рис. 7.

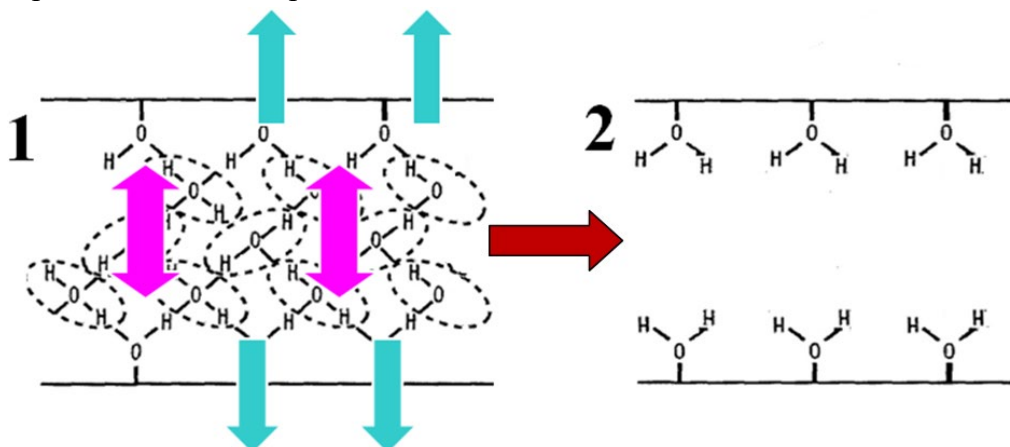


Рис. 7. Схематична інтерпретація зміни діелектричних втрат при твердінні:
1 – стадія 1; 2 – стадія 2

Зміна електропровідності. Електропровідність на змінному струмі низької частоти обумовлена переміщенням іонів та зміною у часі їх концентрації. Зниження концентрації іонів OH^- обумовлено пуцоланічною активністю добавок, що застосовуються для стабілізації гіпсо-цементних сумішей (зола, шлак). Основним внеском у зміну електропровідності є перенасичення розчину, що формується на перших хвилинах, і зменшення ефективного вільного об'єму розчину, що проводить, в результаті зростання новоутворень. На інтервалі 15-20 хв унаслідок участі вільної води у процесах гідратації (рис. 7) відбувається можлива зміна механізму передачі заряду. Якщо на ранніх термінах гідратовані іони переміщалися в об'ємі вільної води, що заповнює капілярно-пористу структуру матеріалу, після зазначеного терміну ймовірний механізм передачі заряду – естафетний, що відбувається за участю шарів зв'язаної води на внутрішній поверхні пористої структури. Зміна механізму перенесення іонів обумовлена, ймовірно, фактичним злам на графіку електропровідності (рис. 6) при 15-20 хв.

Термічні ефекти Дослідження, що протікають у процесі структуроутворення аналізованих композитів, дозволяє виявити кілька процесів, що частково перетинаються в часі, кожному з яких відповідають характерні ділянки графіків тепловиділення (рис. 6). Початкові стадії твердіння (0-4 хв) та відповідні ділянки графіка відповідають стадії початку тужавлення – стадії адсорбції води на поверхні частинок, початку топохімічної реакції гідратації гіпсу. Ділянка кривої (4-14 хв) відповідає протіканню гідратації гіпсової компоненти, що супроводжується тепловиділенням. На цих етапах починає гідратуватися цемент і входить у реакцію зола. Наступні етапи (15-30 хв) характеризуються слабким тепловиділенням. Тут гідратації піддається переважно мінерали цементу і проявляється пуцоланічна активність вапна. Одночасно відбувається формування кластера частинок композиту, пов'язаних кристалізаційними контактами.

Швидкість ультразвуку. Швидкість ультразвуку стрибкоподібно зростає при формуванні провідної перколяційної структури (переважно кістяка перколяційного кластера). До цього стрибка швидкість ультразвуку мала (1-3 хв), Прилад не спрацьовує. Цей факт дозволяє приблизно ототожнити різке зростання швидкості при початку тужавлення з моментом першого спрацьовування ультразвукової установки (4-5 хв, рис. 6). Кінець тужавлення немає різких, стрибкоподібних проявів. Для його виявлення використовуються порівняльні методи або дослідження більш тонких властивостей графіка швидкості ультразвуку – його кривизну $k(x)$ або радіус кривизни [8] (рис. 8). Структурні переходи при цьому відповідають перетину графіком кривизни осі абсцис та обертання кривизни в нуль.

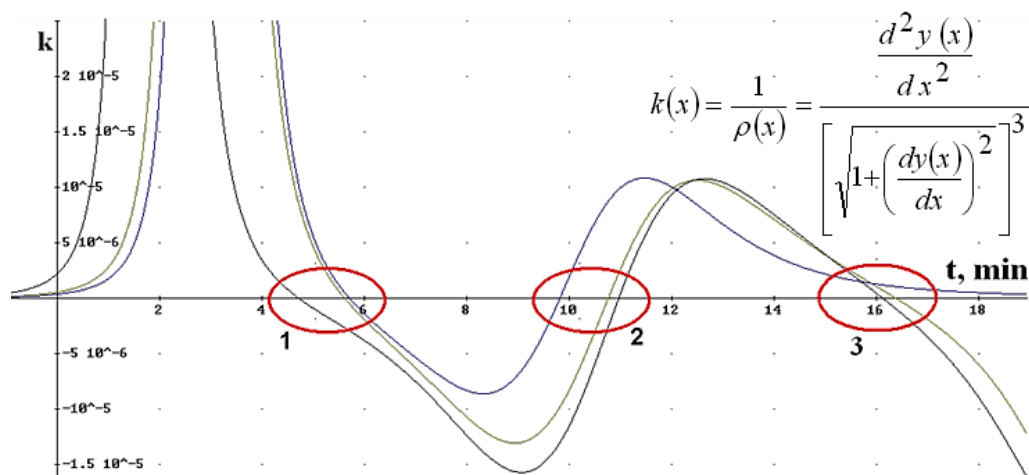


Рис. 8. Кривизна графіків швидкості ультразвукових імпульсів як функція часу процесу твердіння:
1, 2, 3 – області структурних переходів у матеріалі

Зі структурних уявлень і деяких понять теорії перколяції [9; 10] особливості зміни швидкості ультразвуку інтерпретуються в такий спосіб. Ієрархічна структура композиційного матеріалу, при спрощеному розгляді, може бути піддана системному «перетину» на мезоскопічному масштабному рівні, в результаті чого формується мережева модель, вузлами якої є кластери ~ 30 частинок (0,2 мм), через які ультразвуковий імпульс здатний поширюватися як через єдине ціле. Власне моделлю композиту, що твердіє, є динамічна мережева структура з вузлів розглянутої природи і зв'язків, що реалізуються кристалізаційними (фазовими) контактами. Переходи, що спостерігаються в ультразвукових експериментах можуть бути інтерпретовані в термінах топологічної структури мережі, що росте. Для першого переходу (початку тужавлення) досить легко вказати структурну інтерпретацію – у відповідний момент часу з відокремлених один від одного кластерів, які часто мають фракталоподібний характер, формується єдина провідна структура – перколяційний (поєднуваний) кластер, що забезпечує проходження ультразвукового сигналу між протилежними сторонами зразка. У момент утворення такого кластера спостерігається перше спрацьовування вимірювального приладу (рис. 6, 4 хв). Поряд зі структурою «червоного» кістяка, що забезпечує провідність, формуються також «мертві кінці» та інші однозв'язані компоненти, що не беруть участь у формуванні властивостей, пов'язаних з провідністю. Наприкінці тужавлення спостерігається формування провідного кістяка, що обріс одно- і двозв'язаними елементами, що займають весь об'єм зразка. Така розгалужено-сітчаста структура, що займає весь об'єм, формується на момент кінця тужавлення (рис. 6, 10 хв). На цьому етапі структурні зміни не закінчуються, продовжуються гідратаційні процеси та структуроутворення. Розгалужено-сітчаста структура, що включає велику кількість однозв'язаних компонентів, зокрема, «мертвих кінців», перетворюється на сітчасту – однозв'язані компоненти трансформуються в 2- та 3-зв'язані; тривимірна мережа, що відображає структуру каменеподібного тіла, формується майже повністю. Трансформації основної кількості однозв'язаних структур у 2- і 3-зв'язані та їх входження до складу провідного кістяка відповідає третій перехід (рис. 6, 15 хв). Таким чином, третій перехід відповідає затвердінню та остаточному формуванню каменеподібного тіла з переважаючими пружними характеристиками.

Порівняльний аналіз неруйнівних методів. Перший етап аналізу застосовності розглянутих методів – зведення основних якісних змін на єдину часову шкалу (рис. 9) та таблицю.

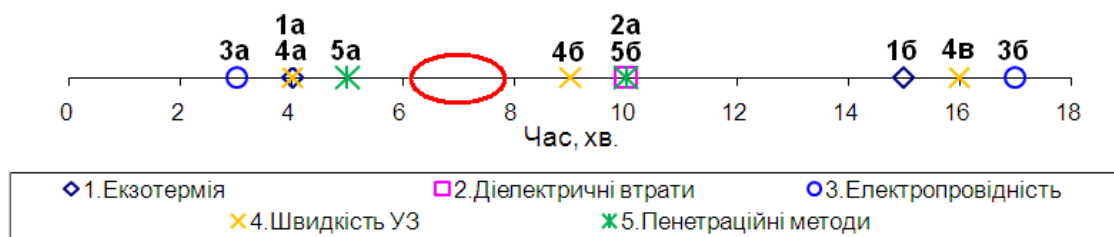


Рис. 9. Якісні зміни характеристик досліджуваного композиту в єдиній часовій шкалі: 1а – 5б – позначення якісних змін, перша цифра відповідає номеру властивості

Червоним еліпсом на рис. 9 позначено інтервал «технологічного» кінця тужавлення. Пояснення наведені в таблиці.

Таблиця – Якісні зміни характеристик досліджуваного композиту

№	Позначення	Час від замішування, хв	Змістовна інтерпретація	Ступінь вираженості
1	3а	3	Перехід до лінійного режиму падіння електропровідності через перехід до стабілізації рівня пересичення розчину	Середня
2	1а	4	Перехід до лінійного термічного режиму та постійної швидкості реакції гідратації. ПТ за термічним критерієм	Середня
3	4а	4	Утворення кластера частинок вихідного композиту, що охоплює, і новоутворень, проникних для ультразвуку. Перше спрацювання УЗ установки. ПТ за швидкістю ультразвуку	Яскрава
4	5а	5	ПТ матричного матеріалу (стандартний тест Віка)	Яскрава
5	4б	9	Обростання кластера новоутворень, що охоплює, «мертвими кінцями». Перехід значення кривизни графіка швидкості ультразвуку через 0. КТ за швидкістю ультразвуку	Середня
6	2а	10	Зниження кількості "вільної" води, зменшення рухливості скелета водневих зв'язків. Виникнення перегину графіку діелектричних втрат. КТ за критерієм діелектричних втрат	Яскрава
7	5б	10	КТ матричного матеріалу, що визначається стандартними методами	Яскрава
8	1б	15	Закінчення основних екзотермічних процесів, пов'язаних із гідратацією	Яскрава
9	4в	16	Формування двозв'язаних фрагментів кластера, що охоплює, з однов'язаних «мертвих кінців», закінчення затвердіння. Перехід кривизни графіка ультразвуку через 0	Не яскрава
10	3б	17	Зміна механізму провідності. Перехід до передачі іонів за шарами зв'язаної води	Яскрава

Дослідження даних таблиці проводилося за кількома критеріями. Оскільки цільовими є структурно-механічні характеристики, що забезпечують можливість укладання та обробки матеріалу, увага приділялася насамперед методам, що дозволяють отримати чіткі, яскраві якісні зміни спостережуваних характеристик, близькі до термінів тужавлення, що визначаються для матричного матеріалу, без частинок наповнювачів, за допомогою стандартизованих методів (випробування за допомогою приладу Віка). Слід зазначити суб'єктивність поняття термінів тужавлення (це, взагалі кажучи, умовні величини) для композитів досліджуваного класу. Ці терміни відрізняються при вимірі різними методами за різними критеріями. Надійним є одночасне застосування кількох методів.

Вибір методів неруйнівної діагностики композиційного матеріалу. Розглянуті дані дозволяють вибрати як основний ультразвуковий метод, що дає чіткий критерій початку тужавлення. Однак кінець твердіння проявляється не так чітко і вимагає додаткової обробки отриманої залежності – вивчення кривизни кривої графіка швидкості ультразвуку. Тому може бути рекомендована пара "швидкість ультразвуку - діелектричні втрати". Якщо

прийняти допустимим аналіз складних властивостей експериментальних кривих, то для визначення термінів тужавлення перспективні також графіки електропровідності та екзотермії. Використання цих даних спільно з диференціально-геометричними методами (аналіз кривизни та радіуса кривизни кривих) становлять інтерес для майбутніх досліджень.

Список використаних джерел

1. Моделирование эксплуатационных характеристик теплозвукоизолирующего композита / А. В. Колесников, В. Я. Керш, Т. В. Ляшенко, М. А. Замула // Моделивання та оптимізація будівельних композитів : матеріали міжнар. семінару. – Одеса, 2020. – С.78-80.
2. Гранковский И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах / И. Г. Гранковский. – Киев : Наукова думка, 1984. – 300 с.
3. Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders / V. Kersh, A. Kolesnikov, N. Xlytsov, A. Foshch // Actual Problems of Engineering Mechanics (APEM 2019) : 6th International Conference – 2019. – Vol. 968. – Pp. 122-127.
4. Ієрархія структурних змін пи твердінні композитів за результатами виміру швидкості ультразвуку / В. Я. Керш, А. В. Колесников, М. А. Замула., О. О. Маковецька // Актуальні проблеми інженерної механіки : IX Міжнар. конф. – Одеса, 2022. – С. 57-62.
5. Wang K. Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field. Federal Highway Administration / K. Wang. – Iowa : Iowa State University, 2008. – 46 p.
6. Хеммингер В. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер. – Москва : Химия, 1990. – 176 с.
7. Ратинов В. Б. До питання про теорію твердіння мінеральних в'язучих речовин / В. Б. Ратинов, Л. Я. Забезжинський, Т. І. Розенберг // Збірник праць НДІЗБ. – 2007. – Вип. 1. – С. 3-4.
8. Соломатов В. И. Полимерные композиционные материалы в строительстве / В. И. Соломатов, А. И. Бобрышев, К. Г. Химмлер. – Москва : Стройиздат, 1988. – 308 с.
9. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы : учеб. пособие / Ю. Ю. Тарасевич. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.

References

1. Kolesnykov A.V., Kersh V.Ya., Lyashenko T.V., & Zamula M.A. (2020). Modelyrovanye ekspluatatsyonnykh kharakterystyk teplozvukozolyruyuschego kompozyta [Modeling of operational characteristics of a heat- and sound-insulating composite]. *Modeliuvannia ta optymizatsiia budivelnykh kompozytiv: materialy mizhnarodnogo seminaru – Modeling and optimization of building composites: materials of the International. seminar* (pp.78-80).
2. Grankovskyi, Y.G. (1984). *Strukturoobrazovanie v myneralnykh v'язhushchykh systemakh* [Structure formation in mineral binders]. Naukova dumka.
3. Kersh, V., Kolesnikov, A., Xlytsov, N., & Foshch, A. (2019). Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders / V. Kersh // Actual Problems of Engineering Mechanics 6th International Conference. “Actual Problems of Engineering Mechanics” (APEM 2019), 968, 122-127.
4. Kersh, V.Ya., Kolesnykov, A.V., Zamula, M.A., & Makovetska, O.O. (2022). Ієрархія структурних змін пи твердінні композитів за результатми виміру швидкості ультразвуку [Hierarchy of structural changes during hardening of composites according to the results of ultrasound speed measurements]. *IX Mizhnarodna konferentsiia «Aktualni problemy inzhenernoi mekhaniky» – Actual problems of engineering mechanics: IX International. conf.* (pp. 57-62).
5. Wang, K. (2008). *Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field. Federal Highway Administration.* Iowa: Iowa State University.
6. Khemmynger, V. (1990). *Kalorymetriia. Teoriia i praktika* [Calorimetry. Theory and practice]. Khimiia.
7. Ratynov, V.B., Zabezhinskii, L.Ya., & Rozenberg, T.I. (2007). Do pytannya pro teoriyu tverdinnya mineral'nykh v'yazhuchykh rehovyn [To the question of the theory of hardening of mineral binders]. *Zb. prats NDIZB – Proceedings of the Scientific Research Institute, 1*, 3-4.
8. Solomatov, V.I., Bobryshev, A.I., & Khimmler, K.G. (1988). *Polimernye kompozitsionnye materialy v stroitelstve* [Polymer composite materials in construction]. Stroizdat.
9. Tarasevych, Yu.Yu. (2002). *Perkoliatsiia: teoriia, prilozheniia, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithm]. Editorial, URSS.

Andrey Kolesnikov¹, Mykhailo Zamula²

¹PhD, Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecology,
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: kolesnikov_himek@ogasa.org.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>. ResearcherID: [IRZ-3809-2023](https://orcid.org/IRZ-3809-2023)

²Graduate Student of the Department of Urban Construction and Economy,
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: zamulamichailodaba@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0029-3758>. ResearcherID: [IRZ-3909-2023](https://orcid.org/IRZ-3909-2023)

NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR CONTROLLING THE SETTING PROCESS OF BUILDING COMPOSITE MATERIALS WITH COARSE AGGREGATES

The article deals with the problem of non-destructive control of the processes of setting and hardening of composite materials, for which coarse filler granules or mixtures of fillers of different granulometric composition are used. Since the use of standardized penetration methods in the cases under consideration becomes impossible, it is possible to draw conclusions about the stages of the processes of structure formation of a composite binder dough only by indirect signs. In such a study, methods are preferable that least disturb the structure of the hardening composite, up to non-contact ones. The article provides a comparative description of several such methods. Two of them are based on the measurement of electrical responses associated with structure formation, the other two are based on the study of exothermic processes and, accordingly, the propagation velocity of ultrasonic pulses in a hardening binder dough. For a typical sample of the studied material, the time dependences of the corresponding physical characteristics are constructed. Qualitative changes in the course of these curves are compared with the boundaries of the stages of the structure formation process. The main qualitative changes in the time dependences of physical properties are interpreted from the standpoint of structural transformations occurring in the material. The measurement results are considered both from a theoretical standpoint, related to the interpretation of changes in the structure and properties of the hardening binder dough, and from an applied standpoint, focused on determining the setting time of the material, which is important for the technology of its application. Changes in physical characteristics are reduced to a single scale, which improves the accuracy of determining the setting time. It is shown that the main method, adequate to the problem under consideration, is conveniently taken to be ultrasonic, which makes it possible to effectively display both the beginning and the end of setting. The remaining methods seem to be complementary, allowing a more thorough study of the processes during the completion of the setting. The considered research methods are also applicable to conventional materials, and some of them, with minimal modification, to hardening samples and products in the practice of building production.

Key words: non-destructive testing, hardening time, ultrasound speed.

Fig.: 9. Table: 1. References: 9.