

УДК 536.7:539.57

Термодинамічний аналіз твердіння пасто- й рідиноподібних елементів музейних експонатів під впливом мікрокліматичних умов приміщення

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², В. Т. Кравчук³, А. С. Москвітіна⁴, М. О. Шишина⁵

¹д.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 2280170@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, ychovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203

³к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, vtk1@ukr.net

⁴асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁵асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, shyshyna.mo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9384-7662

Анотація. Процес реставрації музейних експонатів пов'язаний з формуванням різноманітних структурних середовищ, наприклад, висихання шарів фарб, лаків та твердіння гіпсових і бетонних розчинів. Механіка таких середовищ характеризується спектрами в'язких, пластичних та пружних властивостей у різних їхніх сполученнях. На формування цих середовищ впливають мікрокліматичні умови приміщень, у яких відбуваються ці процеси. Вивчення та керування процесом структуроутворення для отримання середовища із заданими властивостями є важливою технологічною задачею, що вирішується, зокрема, і системами формування мікроклімату. Зміна структурного стану середовища, яке твердіє, може бути оцінена за відповідними змінами пластичної та звичайної механічної міцності, ступеня гідратації, тепловиділення, модуля пружності та ін. У даній роботі під структуроутворенням розуміють процес, у результаті котрого характеристики матеріалу наближаються до характеристик відповідного капілярно-пористого тіла (КПТ), а основним параметром, котрий визначає це наближення, є ступінь завершеності структуроутворення. Аналіз процесу твердіння розглянутих пасто- й рідиноподібних середовищ залежно від стану повітряного середовища на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури вказаних середовищ і оцінювати взаємодію хімічних реакцій і процесу структуроутворення, а отримані зміни швидкості структуроутворення – виявляти й оцінювати деструктивні процеси, які відбуваються при твердінні речовини.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, структуроутворення, консистентність, твердіння, пасто- й рідиноподібні середовища, характеристики, капілярно-пористі тіла.

Постановка проблеми. На даний момент важливою та актуальною проблемою є довгострокове зберігання експонатів музеїв (серед яких капілярно-пористі тіла) при впливі на них штучного освітлення, теплових потоків від відвідувачів, штучного клімату. Для того, щоб прогнозувати подальшу динаміку та поведінку (як параметрів, характеристик, так і самих тіл в цілому) об'єктів дослідження необхідно починати з процесу структуроутворення капілярно-пористих тіл (наприклад процес твердіння лаків, фарб або застигання гіпсових/бетонних статур/оздоблення).

Актуальність дослідження. Аналіз процесу твердіння розглянутих пасто- й рідиноподібних середовищ/тіл під впливом повітряного середовища приміщень на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури вказаних середовищ і оцінювати взаємодію хімічних реакцій і процесу структуроутворення. Отримані зміни швидкості структуроутворення допомагають виявляти й оцінювати деструктивні процеси, які відбуваю-

ться при твердінні речовини.

Останні дослідження та публікації. У зв'язку з розвитком механізації ряду технологічних процесів у найрізноманітніших галузях сучасної промисловості зараз прискореними темпами розширюється кількість операцій, пов'язаних з формозміною різноманітних структурованих середовищ. До таких операцій можна віднести переробку, транспортування вздовж трубопроводів і формування полімерних розчинів і розплавів, будівельних сумішей, харчових мас [1], які є нелінійними рідинами або пастоподібними середовищами зі складним характером течії. Механіка таких середовищ характеризується спектрами в'язких, пластичних та пружних властивостей у різних їхніх сполученнях. В технологічних операціях відбуваються, як правило, великі зсувні деформації, які набагато перевищують межу пружності. Тому найбільш суттєвими для технологічних розрахунків є в'язкопластичні властивості. Вони показують зв'язок між наявними напруженнями зсуву τ , Па, і швидкістю незворотної зсувної деформації/течії $\dot{\gamma}$, s^{-1} ,

[2-3].

Формулювання цілей статті. Задля якісного опису зв'язку між наявними напруженнями зсуву τ , Па, та швидкістю незворотної зсувної деформації $\dot{\gamma}$, с^{-1} , прийнято використовувати криві консистентності, які зв'язують ці величини, або залежності коефіцієнта ефективної в'язкості $\eta^* = \tau/\dot{\gamma}$, Па·с, від швидкості незворотної зсувної деформації $\dot{\gamma}$, с^{-1} . Для узагальнення та подальшого аналізу впливових факторів важливо мати рівняння консистентності у найбільш простій формі. Воно дозволяє безпосередньо з даних реологічного експерименту отримати інваріантні характеристики для кожної речовини (рідини, суміші, тощо). Це найбільш просто можна зробити шляхом проектування кривої консистентності у перетворених координатах, які дозволяють з достатньою точністю знаходити лінійну координацію між експериментальними величинами [2].

Основна частина.

1. Варіанти рівнянь консистентності структурованих (настоподібних й рідноподібних) середовищ.

Часто проектування кривої консистентності в перетворених координатах вдається шляхом використання логарифмічних координат $Y = \ln \eta$ й $X = \ln \dot{\gamma}$. У дослідях із сумішами на ротатійному реометрі «кільце – кільце» [4] найбільш зручними координатами для вирівнювання окремих ділянок кривої $\eta^*/\eta_0 = \Phi(\dot{\gamma}) \in Y = \ln \eta$ й $X = \ln \dot{\gamma}$, с^{-1} , де η – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Па·с, а η_0 – початкова динамічна в'язкість середовища, Па·с.

У цьому випадку коефіцієнт ефективної в'язкості η^* визначається рівнянням

$$\eta^* = \eta_0 e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (1)$$

де β – емпіричний коефіцієнт, с^{-1} , що показує інтенсивність падіння коефіцієнта ефективної в'язкості $\eta^* = \tau/\dot{\gamma}$, Па·с, зі зростанням швидкості $\dot{\gamma}$, с^{-1} . У рівнянні (1) коефіцієнт динамічної в'язкості η_0 , Па·с, відповідає $\dot{\gamma} \rightarrow 0$. Сімейство кривих (1) при різних β показана на рис. 1. За формулою (1) крива консистентності (рис. 2) має рівняння

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}}, \text{ Па}. \quad (2)$$

Координаті $\dot{\gamma} = \beta$, с^{-1} , відповідає максимальне значення напруження τ_{max} , Па.

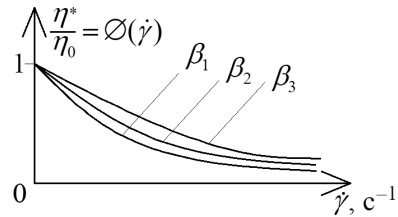


Рис. 1. Залежність відношення η^*/η_0 від швидкості зсувної течії $\dot{\gamma}$, с^{-1} згідно з рівнянням (1): $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$; $\beta_{1,2,3} = \text{const}$

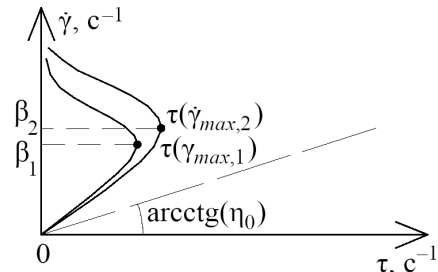


Рис. 2. Сімейство кривих консистентності відповідно до рівняння (2): $\dot{\gamma}_{max,1} = \beta_1$; $\dot{\gamma}_{max,2} = \beta_2$; $\tau(\dot{\gamma}_{max,1}) = \tau_{max,1} = \eta_0 \beta_1 e^{-1}$; $\tau(\dot{\gamma}_{max,2}) = \tau_{max,2} = \eta_0 \beta_2 e^{-1}$

Для розширення області застосування кривих консистентності практичний інтерес представляють деякі найбільш загальні форми рівняння (2). Так, наприклад, рівняння кривої (рис. 3) консистентності структурованої рідини (крива Оствальда [5]), має вигляд

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па}, \quad (3)$$

де η_∞ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с, при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$. Член $\eta_\infty \dot{\gamma}$, Па, у рівнянні (3) при цьому відповідає ньютонівській течії повністю зруйнованої структури. Спрямляється ця крива в координатах $Y = \ln(\eta^* - \eta_\infty)$ і $X = \dot{\gamma}$, с^{-1} . Звідси неважко отримати $\ln(\eta_0)$ та β . η_∞ , Па·с, знаходиться із дослідів, проведених при достатньо значних величинах $\dot{\gamma}$.

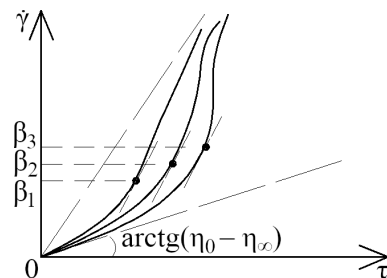


Рис. 3. Сімейство кривих консистентності структурованої рідини (крива Оствальда) відповідно до рівняння (3), де $(\beta_1 < \beta_2 < \beta_3)$

Для опису нелінійної течії пластиків [6] слід початок течії пересунути на величину граничного напруження зсуву τ_0 , Па. При цьому не слід зсувати радіальну ділянку, що відповідає ньютонівській течії зруйнованої структури

з коефіцієнтом динамічної в'язкості η_∞ , Па. Рівняння кривої консистентності (рис. 4) набуває ще більш загального характеру

$$\tau = (\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}) e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па.} \quad (4)$$

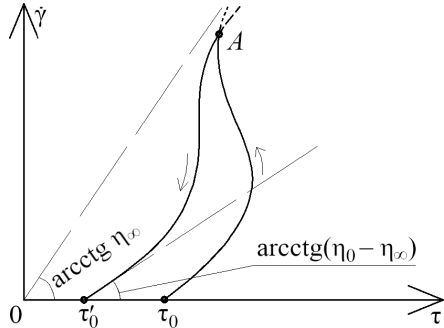


Рис. 4. Гістерезисна петля тіксотропії нелінійного пластика відповідно до рівняння (4) або (5)

Випрямлення рівняння (4) можна здійснити у тих же координатах, що і (3). Значення $\ln((\tau/\dot{\gamma}) + \eta_0)$ легко знайти у вигляді відрізка на координаті Y . Коефіцієнт β , c^{-1} , відповідає нахилу отриманої прямої.

Для опису обох гілок тіксотропної (за наявності навіть постійної швидкості деформації рідини в'язкість поступово зменшується) кривої також можна використати рівняння (4) у наступній модифікації

$$\tau = (\chi(\dot{\gamma} \eta_0 + \tau_0) + (\chi - 1)(\dot{\gamma} \eta'_0 + \tau'_0)) \times e^{(k\chi - k(1-\chi))\dot{\gamma}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па,} \quad (5)$$

де χ – функція включення, що має вигляд

$$\chi = \begin{cases} +1 & \text{при навантаженні;} \\ 0 & \text{при розвантаженні;} \end{cases} \quad (6)$$

k – емпіричний коефіцієнт, c , обернений до β ; величини без штриха відповідають правій гілці петлі тіксотропії, а зі штрихом – лівій.

Рівняння (5) і (6) дозволяють аналітично розрахувати площу отриманої таким чином петлі в'язкого гістерезису, а саме

$$S = \int_0^{\dot{\gamma}_A} (\tau(\dot{\gamma})|_{\chi=1} - \tau(\dot{\gamma})|_{\chi=0}) d\dot{\gamma}, \text{ Па}\cdot\text{с,} \quad (7)$$

де $\dot{\gamma}_A$ – швидкість $\dot{\gamma}$, c^{-1} , у точці A перетину віток петлі гістерезису. Її можна знайти з наступного трансцендентного рівняння

$$\tau(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma}=\dot{\gamma}_A; \chi=1} = \tau(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma}=\dot{\gamma}_A; \chi=0}, \text{ Па,} \quad (8)$$

або після підставлення рівняння (5)

$$(\dot{\gamma}_A \eta_0 + \tau_0) \times e^{k\dot{\gamma}_A} + \eta_\infty \dot{\gamma}_A = -(\dot{\gamma}_A \eta'_0 + \tau'_0) e^{-k\dot{\gamma}_A} + \eta_\infty \dot{\gamma}_A, \text{ Па.} \quad (9)$$

Коефіцієнт ефективної в'язкості, Па·с, концентрованих дисперсних систем [6] та нелінійних рідин [5] із зростанням $\dot{\gamma}$ завжди знижується (псевдопластичні рідини / середовища). Проте, як було зазначено у [3], не завжди це зниження має експоненціальний характер, який відповідає рівнянню (1). У [5] зазначені основні фізичні причини та механізми, за яких середовище/тіло проявляє властивості псевдопластичності. Нижче викладений основний зміст цих міркувань.

Різні реологічні моделі середовищ (наприклад, Оствальда-де-Віля, Рабіновича, Бріана, Кессона, Балклі-Гершеля, Шульмана) виявляють одну й ту ж спільну особливість механічної поведінки при зсувній течії, а саме псевдопластичність. Прикладами псевдопластичних рідин можуть слугувати (полі)-етиленгліколь, гліцерин, мазути, загущені палива, розчини каучуку, змащування й мастила різних типів, розплави та розчини полімерів, нафти та багато високов'язких нафтопродуктів, паперові пульпи, фарби, фармацевтичні засоби (емульсії, креми, пасти), багато харчових продуктів (сметана, жири), біологічні рідини (кров, плазма, синовіальні рідини) тощо. Прояв псевдопластичності полягає в зменшенні уявної (ефективної) в'язкості зі зростанням напруження (швидкості) зсуву. Середовище немов би “розріджується” та стає більш рухливим.

У нерухомому дисперсному середовищі несферичні часточки або молекули дезорієнтовані хаотичним тепловим рухом. У неоднорідному полі швидкості ($\dot{\gamma} \neq 0$) кінці часток будуть знаходитися під впливом неоднакового (неоднорідного) силового поля з боку рухомого середовища. Виникає обертальний момент, який намагається розмістити часточку вздовж вектора швидкості течії.

Таким чином, лінійність кривої течії й відповідний найбільший коефіцієнт ньютонівської в'язкості μ_0 , Па·с, за малої швидкості зсуву обумовлені переважанням броунівського руху над порівняно слабким орієнтувальним ефектом течії. Ньютонівська поведінка в області великої швидкості зсуву і відповідний коефіцієнт в'язкості μ_∞ , Па·с, пов'язані з граничною оріє-

нтацією часток, що превалює над тепловими рухами. Зрозуміло, що $\mu_0 > \mu_\infty$, Па·с, оскільки рух дисперсійного середовища відносно хаотично розміщених часток (молекул) повинен супроводжуватися набагато більшим розсіюванням енергії, ніж у випадку упорядкованого їхнього розміщення.

Інше тлумачення псевдопластичності виходить з уявлення про наявність на частках сольватних оболонок і надмолекулярних структур. В'язкість залишається незмінною при зростанні напруження зсуву τ , Па, до деякої межі, поки не перевищено міцність зв'язку сольватної оболонки з поверхнею дисперсної фази.

З подальшим зростанням із сольватних оболонок вивільняється частина зв'язаного дисперсійного середовища. Це підвищує текучість дисперсної системи, оскільки зменшується фактична об'ємна концентрація часток. В'язкість буде спадати до повного руйнування сольватних оболонок.

Перевищення μ_0 над μ_∞ , Па·с, пояснюється тим, що за малих напружень рух середовища через ґратку більш крупних за розміром сольватованих часток більш стиснутий. Крім того, послаблюється взаємодія між частками у зв'язку зі зменшенням їхніх розмірів.

Відомі дисперсні системи, у яких залежність коефіцієнта динамічної в'язкості від напруження (швидкості) зсуву протилежна, тобто величина μ , Па·с, зростає зі зростанням напруження (швидкості) зсуву. Ця властивість, що отримала назву дилатантності, зустрічається, в основному, у грудко-дисперсних чи високонцентрованих систем. Перші дослідження дилатантності провів О. Рейнольдс [7, 8].

Загальноприйняте трактування механізму дилатантності спирається на зміни при зсуві пакетів часток твердої фази з таким збільшенням пористості, яке перевищує наявний об'єм незв'язаного дисперсного середовища. Тоді, поряд з прошарками рідини, всередині текучого середовища з'являються "порожнини" й сухі контакти, зачеплення твердої фази.

Дилатантність проявляють висококонцентровані водні суспензії порошоків двоокису титану, заліза, слюди, кварцу, крохмалю, водні розчини гуміарабіку, мокрий річковий пісок тощо.

Для цієї категорії моделей характерним є наявність межі текучості τ_0 , Па, тобто наявність деякого мінімального напруження зсуву, нижче якого течія відсутня.

Неважко показати, що криві консистентності з формою, аналогічною рис. 2...4, можуть бути також отримані, якщо в основу їхнього утворення закладена інша функція $\eta^*/\eta_0 = \mathcal{O}(\dot{\gamma})$,

яка має зовнішню схожість з кривою (1) на рис. 1. Тоді, наприклад, для нелінійного пластика в загальному випадку маємо

$$\tau = (\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}) \mathcal{O}(\dot{\gamma}) + \dot{\gamma} \eta_\infty. \quad (10)$$

Зазначимо, що рівняння (5) має більш загальну форму, ніж широко використовуване у практиці реології пластиків рівняння Шведова–Бінгама $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$, Па, яке може бути отримане при $\mathcal{O}(\dot{\gamma}) = 1$ та $\eta_\infty = 0$ ($\eta_0 \equiv \mu$, Па·с). Наприклад, якщо зниження η^* , Па·с, зі зростанням $\dot{\gamma}$, с^{-1} , має форму степеневі функції [3], яка спрямляється (приймає вигляд прямої) у подвійних логарифмічних координатах, тоді зручно прийняти, що

$$\eta^* = \mathcal{O}(\dot{\gamma}) = (1 + \dot{\gamma})^{-\tilde{k}}. \quad (11)$$

Це рівняння також відповідає рис. 1, а емпіричний коефіцієнт \tilde{k} відображає інтенсивність зниження коефіцієнта в'язкості η^* , Па·с зі зростанням швидкості $\dot{\gamma}$, с^{-1} . Тоді консистентність нелінійного пластика описується рівнянням

$$\tau = (\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma})(1 + \dot{\gamma})^{-\tilde{k}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па}. \quad (12)$$

Форма кривої за рівнянням (12) подібна до рис. 4. На відміну від формули (4) ордината точки, найбільш віддаленої від променя $\text{arctg}(\eta_\infty)$, дорівнює $1/(\tilde{k} - 1)$. Спрямлення цього рівняння з метою отримання його параметрів здійснюється в координатах $Y = \lg(\eta^* - \eta_\infty)$ та $X = \lg(1 + \dot{\gamma})$.

Відрізок на осі Y відповідає значенню $\lg((\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma})/\dot{\gamma})$, а \tilde{k} – відповідає нахилу отриманої прямої. Подібним чином із використанням формули (11) можна отримати при $\tau_0 = 0$ рівняння консистентності нелінійної рідини.

Зазначимо, що в процесі нагрівання середовища, яке рухається в циліндричному каналі, відбувається поступове зниження межі плинності/текучості τ_0 , Па, й зменшується нахил кривих $\tau(\dot{\gamma})$. Тобто його коефіцієнт пластичної в'язкості μ_p , Па·с, спадає.

З'ясувалося [5], що, наприклад, для більшості фарб при температурі T , К, вище 333,15...343,15 К (60...70 °С) криві течії $\tau(\dot{\gamma})$, Па, стають ньютонівськими, тобто $\tau = \mu \dot{\gamma}$, Па. Подальший процес нагрівання змінює лише коефіцієнт в'язкості μ , Па·с.

Залежності $\tau_0(T)$, Па, і $\mu = \eta_m(T)$, Па·с, гарно описуються рівнянням виду [5]

$$\begin{cases} \tau_0(T) = \alpha e^{-bT}; \\ \eta_p \equiv \eta_{nl} \equiv \mu_p \equiv \mu_{nl} = \alpha_1 e^{-b_1 T}. \end{cases} \quad (13)$$

Дослідники реологічних властивостей різноманітних рідин роблять велику кількість спроб, щоб створити універсальну реологічну модель, спільну для всіх рідин широкого класу, наприклад, неньютонівських, чисто в'язких. [5]. Така модель мала б єдину криву течії, у той час як кожна з відомих зараз реологічних моделей – Кессона, Балклі-Гершеля та ін. – індивідуальна. Ці моделі мають стільки однотипних кривих течії, скільки мають конкурентних значень реологічні параметри в математичному записі моделі.

У роботі [9] також запропонована така універсальна крива течії, яка є модифікацією степеневого реологічного рівняння,

$$\tau = \bar{k} |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}, \quad n < 1. \quad (14)$$

Як зазначено вище, коефіцієнт неньютонівської в'язкості будь-яких текучих речовин у всьому можливому діапазоні зміни швидкості зсуву змінюється від одного постійного значення μ_0 , Па, до іншого μ_∞ , Па причому у загальному випадку псевдопластичних рідин $\mu_0 > \mu_\infty$, Па.

Типова крива (рис. 5) хода залежності $\mu_a \equiv \mu^* = \mu_a(\dot{\gamma}) \equiv \mu^*(\dot{\gamma})$, Па·с, крім двох горизонтальних ділянок має ще й нелінійну частину з точкою перетину $(\mu_n, \dot{\gamma}_n)$.

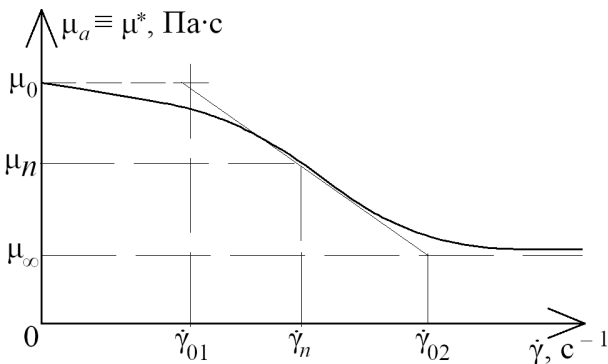


Рис. 5. Типова хода залежності $\mu_a(\dot{\gamma})$, Па·с, для псевдопластичних речовин/рідин

Таким чином,

$$\begin{cases} \mu \rightarrow \mu_0 & \text{при } \dot{\gamma} \rightarrow 0; \\ \mu \rightarrow \mu_\infty & \text{при } \dot{\gamma} \rightarrow \infty; \\ \mu = \mu_n; \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_n; & \text{при } \frac{d^2 \mu}{d \dot{\gamma}^2} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Універсальна реологічна модель для нелінійно-в'язкого середовища

$$M = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} \Gamma^{2n+1} \right), \quad (16)$$

де $M = \alpha \lg(\mu/\mu_0)$ – безрозмірний ефективний коефіцієнт в'язкості; $\Gamma = \beta \lg(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_i) + \lambda$ – безрозмірна швидкість зсуву; $a_1, a_2, \dots, a_{2n+1}$ – константи; $\dot{\gamma}_i$ – значення швидкості $\dot{\gamma}$, с^{-1} , при $\Gamma = \lambda$; α, β і λ – реологічні параметри індивідуальних текучих речовин.

На практиці достатньо користуватися скороченою формою запису універсальної кривої течії

$$M = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} (\Gamma + 0,172 \Gamma^3 + 0,422 \Gamma^5). \quad (17)$$

При розв'язуванні крайових задач, однак, оперувати обома варіантами універсальної кривої течії за формулами (16) і (17) доволі важко. Для цієї мети пропонується лінеаризована форма кривої течії (рис. 6) [5]¹

$$M = \frac{1}{\pi} \left(- \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \operatorname{H} \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \operatorname{H} \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad (18)$$

де $\operatorname{H}(\Gamma)$ – ступінчаста функція

$$\operatorname{H}(\Gamma) = \begin{cases} 0 & \text{при } \Gamma < 0; \\ D & \text{при } \Gamma = 0; \\ 1 & \text{при } \Gamma > 0, \end{cases} \quad (19)$$

де D – у даному випадку довільне скінченне число, зручне для реалізації обчислень. У рівнянні (18) воно завжди множиться на нуль, тому не впливає на результат.

За формулами (18) і (19)

¹ Порівняння рис. 1.12 і формули (1.58) у роботі [5] показує наявність друкарської помилки. У зазначеній формулі пропущено знак мінус перед першим членом у квадратних дужках. Додання пропущеного знака дозволяє отримати відповідність до формули (1.59).

$$\begin{cases} M=0 & \text{при } \Gamma < -\frac{\pi}{2}; \\ M=-\frac{1}{\pi}\left(\Gamma + \frac{\pi}{2}\right) & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \Gamma < \frac{\pi}{2}; \\ M=-1 & \text{при } \Gamma > \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (20)$$

Неважко показати [5], що лінеаризована модель є модифікацією степеневого реологічного рівняння Оствальда-де-Віля (14).

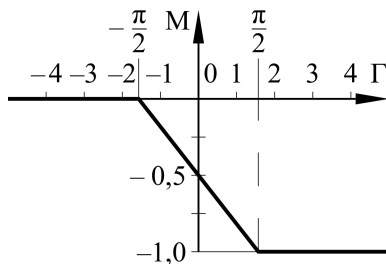


Рис. 6. Універсальна крива течії $M(\Gamma)$ (18) і (19) або (20)

У природних змінних умови формули (18) набувають вигляду

$$\begin{cases} \mu = \mu_0 & \text{при } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi+2\lambda}{2\beta}}; \\ \mu = 10^{-\frac{2\lambda+1}{2\alpha}} \mu_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_n}\right)^{-\frac{\beta}{2\alpha}} & \text{при } \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi+2\lambda}{2\beta}} < \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi-2\lambda}{2\beta}}; \\ \mu = \mu_\infty & \text{при } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi-2\lambda}{2\beta}}. \end{cases} \quad (21)$$

Таким чином, запропонована низка конкретних рівнянь, а також ряд рівнянь більш загальної форми, які дозволяють описувати реологічну поведінку нелінійних рідин і пластиків при стаціонарному варіанті зсувної течії. Ці рівняння дозволяють розраховувати поведінку матеріалів при реставрації музейних експонатів залежно від температури навколишнього середовища. Остання враховується через зміну реологічних параметрів.

Параметри отриманих рівнянь мають загальноприйнятний фізичний зміст:

- межа плинності/текучості τ_0 , Па;
 - коефіцієнт в'язкості незруйнованої структури η_0 , Па·с;
 - коефіцієнт в'язкості повністю зруйнованої структури η_∞ , Па·с;
- Параметр β або k може бути визначений як

міра тіксотропії.

Встановлений загальний характер функції $\varnothing(\dot{\gamma})$ залежить від вибору такої системи координат, у якій експериментатор може отримати спрямлення експериментальної кривої консистентності з максимальною кореляцією.

2. Термодинамічний аналіз процесу структуроутворення матеріалу при наближенні його характеристик до таких, що відповідають типовим капілярно-пористим тілам (КПТ).

Структуроутворення є важливим процесом у технології реставрації музейних експонатів. Зміна структурного стану речовини, що твердіють, може бути оцінена за відповідними змінами пластичної та звичайної механічної міцності, ступені гідратації, тепловиділення, модуля пружності тощо.

У даному дослідженні під структуроутворенням розумітимемо процес, у результаті якого характеристики матеріалу наближаються до характеристик відповідного типового капілярно-пористого тіла [10]. Основним параметром, який визначає це наближення, є степінь завершеності структуроутворення [10]

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{u_\tau - u_a}{u_{n_0}}, \quad (22)$$

де u_τ – вологовміст матеріалу, кг/кг; u_a – те ж, на стадії типової капілярно-пористої структури; u_{n_0} – те ж, при $\eta \equiv \mu = 0$; $\eta \equiv \mu$ – коефіцієнт динамічної в'язкості матеріалу, Па·с.

Початковим станом структури $\eta = 0$ є стан, який визначається величиною загального відносного тиску водяного шару $\psi = 1,12$ [11]. У цьому випадку часточки твердої фази речовини, що транспортується, не взаємодіють між собою.

При подальшому зниженні загального відносного тиску ψ або вологовмісту матеріалу u_m починається взаємодія твердих часточок, тобто розвиток внутрішнього поля міжмолекулярних сил. Цей процес обумовлює утворення капілярно-пористої структури матеріалу, яка описується виразом (20).

Зміна структурного стану для аналізу процесу твердіння матеріалу може бути описана діаграмою зміни вологовмісту матеріалу, у якій зміна певного рівня вологовмісту u_m , кг/кг, відповідає зміні потенціалу оводнення θ .

У роботі [12] наведена методика визначення величини потенціалу оводнення θ за умов ізотермічного твердіння матеріалу протягом певного відрізка (періоду) часу.

Методом відбору проб можна визначити кількість води, хімічно зв'язаної мінералами матеріалу, за величиною якої можна судити про ступінь гідратації системи, що твердіє. При цьому проби суміші обробляють спеціальною хімічною речовиною задля припинення реакцій гідратації та для видалення вільної води, яка не прореагувала. Після цього зразки висушують, а потім прожарюють (у спеціальних термічних печах) задля видалення зв'язаної у гідратних новоутвореннях води. Кількість води, яка хімічно-зв'язана наявними у матеріалі мінералами (або їхніми добавками), оцінюється за втратою маси проб при прожарюванні.

На основі отриманих експериментальних змін потенціалу оводнення θ й вологовмісту систем u_m , кг/кг, будують (рис. 7) діаграми $u_m = f(\theta, T)$. На рис. 7 подані також діаграми для відповідних станів типових капілярно-пористих структур $u_a = f(\theta, T)$, кг/кг, які розраховані, згідно з [13], за рівнянням

$$u_a = u_{M, \Gamma} \Psi^a, \text{ кг/кг}, \quad (23)$$

де $u_{M, \Gamma}$ – максимальний сорбційний вологовміст, кг/кг; a – активність оводнення, тобто міра міжмолекулярної взаємодії, яка показує, у скільки разів збільшиться потенціальна енергія 1 моля води при переході з рівноважного пару води у поле сил оводнення даного тіла/речовини [13].

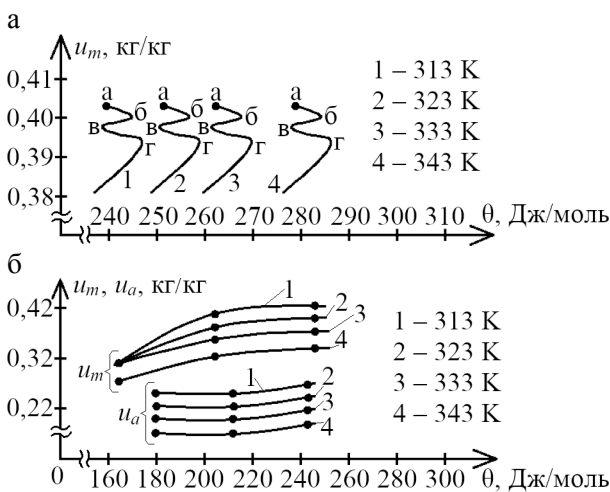


Рис. 7. Діаграми вологісного стану:
а – початкові ділянки; б – процеси кристалізаційного структуроутворення

У результаті аналізу експериментально отриманих ізотерм (рис. 7) вологісний стан матеріалу у процесі його твердіння можна розділити послідовно на п'ять стадій, які характеризуються сингулярними точками на ізотермі

$\theta|_{T=\text{const}} = f(u_m)$, Дж/моль. У роботі [14] наведені подібні діаграми для твердіння мінеральних в'язучих без наявності на них ділянок “а”–“б”–“в”, поява яких обумовлена безпосередньо процесом здимання матеріалу.

На ділянці “а”–“б” відбувається процес хімічної взаємодії пудри металу з лугами, який є переважним порівняно з процесами гідратації та структуроутворення для даного періоду (при тужавінні, наприклад, сумішей, у яких присутні дрібні металеві частки).

Збільшення тиску всередині системи зі збільшенням потенціалу $\theta_{\tau} \equiv \theta|_{T=\text{const}} = f(u_m)$ на ділянці “а”–“б” обумовлене процесом газотворення й, відповідно, зростанням тиску здимання [15].

Розглядаємо в подальшому матеріал типу гіпсу або бетону, який твердіє. Під час здимання відбувається збільшення деформації розширення внаслідок зменшення перерізу речовини між шпарами за рахунок збільшення діаметрів шпар. Це призводить до зростання внутрішніх напружень. З точки зору формування структури матеріалу процес здимання є деструктивним. Точка “б” відповідає найбільшому розвитку внутрішніх напружень, які переважають над процесом структуроутворення, що збігається з даними робіт [16, 17]. У цей період можуть відбуватися такі небажані явища, як “кипіння”, що призводить до руйнування утвореної структури й до повного чи часткового осадження здутої суміші.

Ділянка “в” – “г” на ізотермі (рис. 7) показує збільшення тиску всередині системи. Часточки в'язучого, які мають навколо себе водяну оболонку, під дією молекулярних сил зближуються одна з одною. Виникають контакти між колоїдними часточками й відбувається стискання системи [18, 19].

Після точки “г” незначному зменшенню вологовмісту системи відповідає різке зменшення ψ . У свою чергу це може бути викликане тим, що на межі поділу “пара – рідина” утворюються гнуті меніски. Таким чином, у системі, що досліджується, формується первісна капілярно-пориста структура. При цьому рідина фаза стає дискретною [14]. До початку цього періоду кількість новоутворень зростає. Частинок продуктів реакції зближуються. Утворюються умови, які викликають різке зростання міцності. У подальшому в результаті розвитку внутрішніх напружень швидкість зростання міцності сповільнюється. На наявність такого періоду в цементному тісті гіпсової/бетонної суміші вказують багато дослідників [18-21].

Як вже зазначено вище, у кінці четвертого

періоду незначному зменшенню вологовмісту системи відповідає доволі різка зміна ψ . Це можна пояснити тим, що ущільнення, яке продовжується, відбувається не рівномірно в усьому об'ємі, а в окремих його зонах [19]. У квазікристалічних решітках виникають області "стискання" й "розтягу" [22], які обумовлюють процеси деструкції в системі. Аналогічне зменшення швидкості зростання міцності зазначає ряд авторів для цементного тіста [19-21] й для гіпсу/бетону [23, 24].

Від точки "д", переважними стають процеси кристалізаційного структуроутворення.

На основі експериментальних даних зі співвідношень роботи [10] можна знайти швидкості хімічного зв'язування води I_{ξ} , кг/(кг·год), (рис. 8) й структуроутворення I_{η} , кг/(кг·год), (рис. 9) у часі.

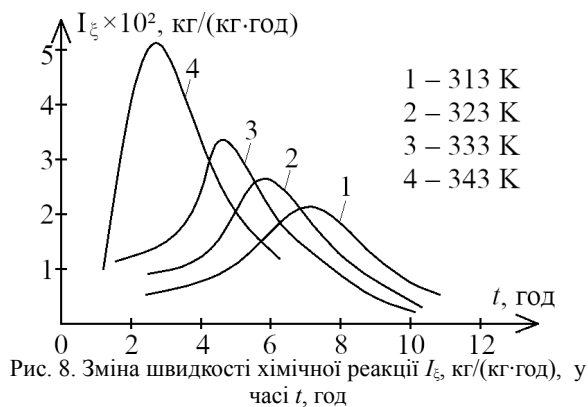


Рис. 8. Зміна швидкості хімічної реакції I_{ξ} , кг/(кг·год), у часі t , год

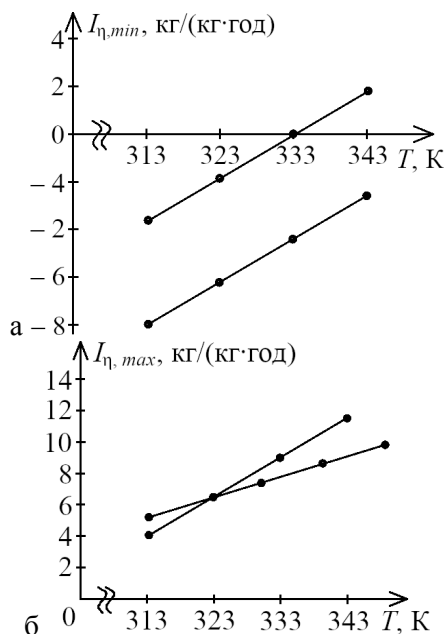


Рис. 9. Вплив температури на абсолютні величини екстремальних значень: а – для першого екстремуму; б – для другого екстремуму

Аналіз швидкості, кг/(кг·год), хімічного зв'язування води (рис. 8) та структуроутворення

(рис. 9) показує, що зміна температури справляє значний вплив як на процес структуроутворення, так і на процес хімічної реакції. Температурний фактор впливає на абсолютні величини й на час настання експериментальних значень I_{ξ} та I_{η} , кг/(кг·год).

При розгляді залежностей $I_{\xi} = f(\tau)$ (рис. 8) та $I_{\eta} = f(\tau)$ (рис. 9) можна помітити, що крива I_{η} розміщується як у додатній, так і у від'ємній областях. У той же час функція I_{ξ} (рис. 9) знаходиться тільки в додатній частині.

З підвищенням температури від 313 К до 333 К на кривих зміни швидкості хімічної реакції I_{ξ} спостерігається збільшення експериментальних значень у середньому на 20 % на кожні 10 К, а у діапазоні 333 К до 343 К – на 35 %. На час, год, настання максимуму функції I_{ξ} вплив температури також є суттєвим. Так, в інтервалі температури від 313 К до 333 К на кожні 10 К поява максимуму функції зсувається ліворуч на 1 год., а від 333 К до 343 К – на дві години. Темп зростання $I_{\xi,max}$ збільшуються з підвищенням температури, що відповідає [20].

Для розглянутого діапазону температури функції I_{η} двічі показують зменшення швидкості структуроутворення $\tau = 0...1$ год і $\tau = 2...5$ год. Це свідчить про те, що двічі відбувається часткове руйнування структури середовища. Час настання експериментальних значень відповідає розвитку деструктивних процесів на діаграмі вологісного стану (рис. 8).

Для двох періодів руйнування структури середовища характерним є те, що зі зменшенням температури швидкість руйнування зростає.

У першому випадку це можна пояснити тим, що зі зростанням температури швидкість структуроутворення більше – зростання в'язкості суміші превалює над зростанням тиску газу, зосередженого у цій суміші.

Підвищення температури від 313 К до 333 К викликає приріст абсолютної величини максимальних значень $I_{\eta,max}$ у чотири рази для першого випадку й два рази – для другого. Мінімум $I_{\eta,min}$ зменшуються відповідно у чотири та п'ять разів (рис. 9). Час настання максимуму швидкості структуроутворення $t_{\eta,max}$ скорочується з 1,5 до 0,75 год. для першого максимуму й з 6,5 год. до 5 год. – для другого.

При спільному розгляді (рис. 8 і 9) залежностей I_{ξ} і I_{η} , кг/(кг·год), необхідно зазначити, що мінімуми (другі) швидкості структуроутворення $I_{\eta,min}$ за часом відповідають максимумам швидкості хімічної реакції $I_{\xi,max}$, що свідчить про взаємозв'язок двох процесів. Зі збільшенням температури ізотермічної витри-

мки, К, скорочується період часу $\Delta t_{max,\eta\xi}$, год, між моментами досягнення максимальних значень швидкості, кг/(кг·год), хімічного зв'язування $I_{\xi,max}$ й структуроутворення $I_{\eta,min}$:

- при $T = 313$ К $\Delta t_{max,\eta} = 2,2$ год;
- при $T = 323$ К $\Delta t_{max,\eta} = 1,9$ год;
- при $T = 333$ К $\Delta t_{max,\eta} = 1,7$ год;
- при $T = 343$ К $\Delta t_{max,\eta} = 0,5$ год.

Найбільший збіг у часі настання $I_{\xi,max}$ та $I_{\eta,min}$, кг/(кг·год), спостерігається в інтервалі температури від 333 К до 343 К.

На основі викладеного вище у п. 2 дослідження можна зробити висновок про те, що аналіз процесу твердіння на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури, яка розвивається відповідно до умов навколишнього повітряного середовища, й оцінювати взаємодію хімічної реакції й процесу структуроутворення.

Виявлено п'ять ділянок на діаграмі вологісного стану, причому поява перших двох обумовлена для гіпсової/бетонної суміші безпосередньо процесом здимання цього середовища.

Отримані зміни швидкості структуроутворення дозволяють виявити й оцінити деструктивні процеси, які відбуваються під час здимання гіпсу/бетону і його твердіння.

Залежність реологічних параметрів середовища $\eta(\tau)$, Па·с, та $\tau_0(t)$, Па, може бути апроксимована експоненціальним законом

$$\eta(\tau) = \eta_0 e^{\bar{\alpha}\tau}, \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad (24)$$

$$\tau_0(t) = \tau_0^o e^{\bar{\beta}t}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (25)$$

де η_0 і τ_0^o – відповідно, коефіцієнт пластичної в'язкості, Па·с, й граничне напруження зсуву, Па, у початковий момент часу $t=0$; $\bar{\alpha}$ й $\bar{\beta}$ – емпіричні коефіцієнти, год⁻¹, які залежать від складу суміші й умов структуроутворення.

Формули (24) й (25) повинні враховуватися при проведенні аналітичних і чисельних розрахунків за конкретною реологічною моделлю суміші (Кессона, Балклі-Гершеля) шляхом усереднення за часом. Саме такий підхід дозволяє лінеаризувати задачу підряду з застосуванням принципу квазістаціонарності.

Згідно з зазначеним принципом реологічні параметри приймаються незмінними протягом розглянутого періоду часу t_0 , год, й рівними своїм середнім значенням $\bar{\eta}$, Па·с, і $\bar{\tau}_0$, Па. Для обчислення цих значень застосовуються співвідношення

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^{t_0} \eta(t) dt}{t_0} = \frac{\eta_0}{\bar{\alpha} t_0} (e^{\bar{\alpha} t_0} - 1), \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad (26)$$

$$\bar{\tau}_0 = \frac{\int_0^{t_0} \tau_0(t) dt}{t_0} = \frac{\tau_0^o}{\bar{\beta} t_0} (e^{\bar{\beta} t_0} - 1), \text{ Па}. \quad (27)$$

На підставі наведених моделей з'являється можливість оптимізувати роботу систем формування мікроклімату для забезпечення сприятливих умов при проведенні реставраційних робіт.

Висновки. Запропонована універсальна модель є корисною для побудови уніфікованих інженерних розрахунків твердіння пасто- й рідиноподібних елементів музейних експонатів. Запропонована низка конкретних рівнянь, а також ряд рівнянь більш загальної форми, які дозволяють описувати реологічну поведінку нелінійних рідин і пластиків при стаціонарному варіанті зсувної течії. Аналіз процесу твердіння на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури, яка розвивається, й оцінювати взаємодію хімічної реакції й процесу структуроутворення.

Література

1. Гуськов К.П. Реология пищевых масс / К.П. Гуськов, Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Л.Н. Лунин. – Москва, 1970. – 206 с.
2. Блох Л.С. Практическая номография / Л.С. Блох. – Москва: Высшая школа, 1971. – 328 с.
3. Файтельсон Л.А. Влияние вибраций на эффективную вязкость цементного теста / Л.А. Файтельсон, В.А. Бриедис. – В кн.: Теория формирования бетона. Научная сессия НИИЖБ / Под ред. Н.Е. Десова, И.Ф. Руденко, Москва, 1969. – С.89-101.
4. Белкин И.М. Ротационные приборы. Измерения вязкости и физико-механических характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов. – Москва: Машиностроение, 1968. – 272 с.
5. Шульман З. П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей / З.П. Шульман. – Москва: Энергия, 1975. – 352 с.
6. Волярович Н. П. О деформативных и прочностных свойствах концентрированных дисперсных систем /

- Воларович Н.П., Малинин Н.И. – Инженерно-физический журнал. 1966. – Т.10. – №6–С. 804-812.
7. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. – Москва: Наука, 1965. – 224 с.
 8. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон. – Москва: Мир, 1964. – 216 с.
 9. Chang C.C. Unified rheological relation of non-newtonian fluids / C.C. Chang, P. Ramanaiah // *Physics of Fluids*. 1961. – Vol. 4. – Iss. 9. – <https://doi.org/10.1063/1.1706466>
 10. Цимерманис Л.-Х.Б Термодинамический анализ твердения минерального вяжущего в закрытой системе / Л.Б. Цимерманис, Д.И. Штакельберг, А.Р. Генкин // VI Межд. конгресс по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1976. – Т. 2. – кн. 2. – С. 25 – 28.
 11. Цимерманис Л.-Х.Б. Потенциал оводнения и феноменологические уравнения переноса в капиллярно-пористых телах / Л.-Х.Б. Цимерманис // Инженерно-физические исследования строительных материалов. – Челябинск, 1976. – С. 3-12
 12. Цимерманис Л. Б. Потенциалографический метод исследования процессов твердения вяжущих / Л. Б.Цимерманис, А. Р.Генкин // Строительные материалы и бетоны. – Челябинск, ЮУКИ. – 1967. – С.31-42.
 13. Цимерманис Л. Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел / Л. Б.Цимерманис. – Челябинск, ЮУКИ. – 971. – 202 с.
 14. Генкин А. Р. Изменения влажностных характеристик структурообразующих систем на основе гидравлических вяжущих / А. Р. Генкин // Инженерно-физические исследования строительных материалов. – Челябинск, 1977. – С. 79-97.
 15. Куннос Г. Я. Элементы технологической механики ячеистых бетонов / Г. Я. Куннос, В. Х. Лапса, В. Х.Линденбергх, А. Б. Солодовник, А. Р. Штейнберг. – Рига: Зинатне, 1976. – 96 с.
 16. Дзенис В. В. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона / Дзенис В. В., Лайса В. Х.. – Ленинград: Стройиздат, 1971. – 112 с.
 17. Чистяков Б. З. Производство газобетонных изделий по резательной технологии / Б. З. Чистяков, И.А. Мысатов, В. И. Бочков. – Ленинград: Стройиздат, 1977. – 240 с.
 18. Сычев М. М. Твердения вяжущих веществ / М. М. Сычев. – Ленинград: Стройиздат, 1974. – 80с.
 19. Мчедлов-Петросян О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. Москва: Стройиздат, 1971. – 224 с.
 20. Горчаков Г. И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков и др. – Москва: Стройиздат, 1976. – 144 с.
 21. Гранковский И. Г. О кинетике твердения минеральных вяжущих веществ / И. Г.Гранковский, Н. Н.Круглицкий // Доклады АН СССР. 1970 – Т. 194 – №1 – С.147-148.
 22. Бутт Ю. М. Портландцемент / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – Москва: Стройиздат, 1974. – 328 с.
 23. Книгина Г. И. Фактор структурообразования газобетонной массы при выдержке до автоклавирования / Г. И. Книгина, Л. В. Осипова, И. Н. Чернышев. – Изв. Вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – №4. – С. 82-85.
 24. Суткевич В. С. О прочностных и деформативных характеристиках ячеистобетонного сырца / В. С. Суткевич, А. Р. Штейнерт, В. Г. Хоромецкий // Технологическая механика бетона. – Рига: РПИ, 1976. – Вып. 1. – С.106-115.

References

1. Huskov K.P., Machikhin Yu.A., Machikhin S.A., Lunin L.N. *Teoriia pishchevykh mass*. 1970.
2. Blokh L.S. *Prakticheskaiia nomografiia*. 1971.
3. Faytelson L.A., Briyedis V.A. “Vliyanie vibratsii na effektivnuiu viazkost tsementnogo testa”. *Teoriia formirovaniia betona. Nauchnaia sessiia NIIZhB*. 1969. P. 89-101.
4. Belkin I.M., Vinogradov G.V., Leonov A.I. *Rotatsionnyie pribory. Izmereniia viazkosti i fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik materialov*. Mashinostroenie, 1968.
5. Shulman Z.P. *Konvektivnyi teplomassoperenos reologicheskii slozhnykh zhidkosti*. Energiia. 1975.
6. Volarovich N.P., Malinin N.I. “O deformativnykh i prochnostnykh svoistvakh kontsentrirrovannykh dispersnykh sistem”. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1966. №10. P. 804-812.
7. Reyner M. *Reologiiia*. Mir. 1965.
8. Uilkinson U.L. *Neniutonovskie zhidkosti*. Mir. 1964.
9. Chang C.C., Ramanaiah P. “Unified rheological relation of non-Newtonian fluids”. *Physics of Fluids*. 1961. V.4. No.9.
10. Tsimermanis L.B., Shtakelberg D.I., Genkin A.R. “Termodinamicheskii analiz tverdeniia mineralnogo viazhushchego v zakrytoi sisteme”. *VI MKKKhTs*. 1976. T.2. kn.1. P. 25-28.
11. Tsimermanis L.B. *Potentsial ovodneniia i fenomenologicheskii uravneniia perenosa v kapilliarno-poristykh telakh*. – V kn.: *Inzhenerno-fizicheskiye issledovaniya stroitelnykh materialov*. Chelyabinsk. 1976. S.3-12.
12. Tsimermanis L.B., Genkin A.R. “Potentsialograficheskii metod issledovaniia protsessov tverdeniia viazhushchikh”. *Stroitelnyye materialy i betony*. YuUKI. 1967. P. 31-42.

13. Tsimermanis L.B. *Termodinamicheskie i perenosnye svoistva kapillarno-poristyykh tel*. YuUKI. 1971.
14. Genkin A.R. "Izmeneniia vlazhnostnykh kharakteristik strukturoobrazuiushchikh sistem na osnove gidravlicheskiykh viazhushchikh". *Inzhenerno-fizicheskie issledovaniia stroitelnykh materialov*. Cheliabinsk. 1977. P. 79-97.
15. Kunnos G. Ya., Lapsa V. Kh., Lindenberg B. Ya., Solodovnik A. B., Shteynbert A. R. *Elementy tekhnologicheskoi mekhaniki yacheistykh betonov*. Zinatne. 1976.
16. Dzenis V. V., Laysa V. Kh. *Ul'trazvukovoi kontrol tverdeiushchego betona*. Stroyizdat. 1971.
17. Chistyakov B. Z., Mysatov I. A., Bochkov V. I. *Proizvodstvo gazobetonnykh izdelii po rezatelnoi tekhnologii*. Stroyizdat. 1977.
18. Sychev M. M. *Tverdeniia viazhushchikh veshchestv*. Stroyizdat. 1974.
19. Mchedlov-Petrosian O. P. *Khimiia neorganicheskikh stroitelnykh materialov*. Stroyizdat. 1971.
20. Gorchakov G. I. *Sostav. struktura i svoistva tsementnykh betonov*. Stroyizdat. 1976.
21. Grankovskii I. G., Kruglitskii N. N. "O kinetike tverdeniia mineralnykh viazhushchikh veshchestv". *Doklady AN SSSR*. 1970. T. 194. №1. P.147-148.
22. Butt Yu. M., Timashev V. V. *Portlandsement*. Stroyizdat. 1974.
23. Knigina G. I., Osipova L. V., Chernyshev I. N. "Faktor strukturoobrazovaniia gazobetonnoi massy pri vyderzhke do avtoklavirovaniia". *Izv. Vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura*. 1969. №4. P. 82-85.
24. Sutkevich V. S., Shteynert A. R., Khorometskiy V. G. "O prochnostnykh i deformativnykh kharakteristikakh yacheistobetonogo syr'tsa". *Tekhnologicheskaya mekhanika betona*. RPI. 1976. Vyp. 1. P.106-115.

УДК 536.7:539.57

Термодинамический анализ твердения пасто- и жидкоподобных элементов музейных экспонатов под влиянием микроклиматических условий помещения

В.Б. Довгалюк¹, Ю.В. Човнюк², В.Т. Кравчук³, А.С. Москвитина⁴, М.О. Шишина⁵

¹д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 2280170@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

³к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, vtk1@ukr.net

⁴асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁵асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

Аннотация. Процесс реставрации музейных экспонатов связан с формированием различных структурных сред, например, высыхания слоев красок, лаков и твердения гипсовых, бетонных растворов при реставрации статуй, элементов декора помещений. Механика таких сред характеризуется спектрами вязких, пластичных и упругих свойств в различных их сочетаниях. На формирование этих сред влияют микроклиматические условия помещений, в которых происходят эти процессы. Изучение и управление процессом структурообразования для получения среды с заданными свойствами является важной технологической задачей, которая решается, в частности, и системами формирования микроклимата. Изменение структурного состояния твердеющей среды может быть оценено по соответствующим изменениям пластической и обычной механической прочности, степени гидратации, тепловыделения, модуля упругости и др. В данной работе под структурообразованием понимается процесс, в результате которого характеристики материала приближаются к характеристикам соответствующего капиллярно-пористого тела (КПТ). Основным параметром, который определяет это приближение, является степень завершения структурообразования. Анализ процесса твердения рассматриваемых пасто- и жидкоподобных сред в зависимости от состояния воздушной среды на основе диаграммы влажностного состояния позволяет фиксировать структурное состояние капиллярно-пористой структуры указанных сред и оценивать взаимодействие химических реакций и процесса структурообразования, а полученные изменения скорости структурообразования - выявлять и оценивать деструктивные процессы, которые происходят при твердении вещества.

Ключевые слова: термодинамический анализ, структурообразование, консистентность, твердение, пасто- и жидкообразные среды, характеристики, капиллярно-пористые тела.

UDC 536.7:539.57

Thermodynamic Analysis of Hardening Paste- and Liquid-Like Elements of Museum Exhibits under the Influence of Microclimatic Conditions in a Room

V. Dovhaliuk¹, Y. Chovniuk², V. Kravchuk³, A. Moskvitina⁴, M. Shyshyna⁵

¹ Dr. Hab., professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2280170@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4836-5354

² PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, yhovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

³ PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine, vtk1@ukr.net

⁴ Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁵ Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

Abstract. The process of restoration of museum exhibits is associated with the forming of various structural media, for example, drying of paints layers, varnishes and hardening of gypsum and concrete solutions during the restoration of statues, elements of room decor. The mechanics of such media is characterized by spectra of viscous, plastic and elastic properties in their various combinations. The forming of these substances is influenced by the microclimatic conditions of the premises, in which these processes take place. In technological operations, as a rule, large shear deformations take place, which greatly exceed the elastic limit. Thus, the most significant for technological calculations are viscoplastic properties, which reflect the relationship between the existing shear stresses and the rate of irreversible shear deformation. For a qualitative description of this relationship, it is customary to use consistency curves that relate shear stresses to the rate of irreversible shear deformation or the dependence of the effective viscosity on the rate of irreversible shear deformation. Structure formation is one of the main processes in the technology of processing solidifying paste-like and liquid-like media when their characteristics approach those inherent in the corresponding capillary-porous bodies. The properties of such media depend on the type and nature of the structure. The study and control of the process of structure formation to obtain a medium with desired properties is an important technological task, which can be solved, in particular, by microclimate systems. The change in the structural state of the solidifying medium can be estimated from the corresponding changes in plastic and conventional mechanical strength, degree of hydration, heat release, elastic modulus, etc. In this work, structure formation is understood as a process, as a result of which the characteristics of the material approach the characteristics of the corresponding capillary-porous body (CPB). The main parameter that determines this approximation is the degree of completeness of structure formation. Analysis of the hardening process of the considered pasty and liquid-like media on the basis of the moisture state diagram makes it possible to fix the structural state of the capillary-porous structure of these media and to evaluate the interaction of chemical reactions and the process of structure formation. And the resulting changes in the rate of structure formation allows to identify and evaluate the destructive processes that occur during solidification of the substance.

Keywords: thermodynamic analysis, structure formation, consistency, hardening, paste- and liquid-like media, characteristics, capillary-porous bodies.

Надійшла до редакції / Received 10.09.2020