

ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ РОБОТИ СИСТЕМИ “ГАЗОБЕТОННА КЛАДКА–ШТУКАТУРНЕ ПОКРИТТЯ”

© Парута В. А., 2015

Висока вартість енергоресурсів потребує впровадження енергозберігальних технологій у будівельне виробництво. Оптимальним рішенням стінової конструкції є використання автоклавного газобетону. За товщини стіни 0,4–0,5 м забезпечується нормативний термічний опір для будь-якого регіону України.

Застосування автоклавного газобетону потребує матеріалів і технологій для його захисту. Обштукатурювання стін з подальшим нанесенням декоративного покриття (декоративні штукатурки, фасадні фарби) є одним з найефективніших техніко-економічних рішень. Проектування складів штукатурних розчинів для автоклавного газобетону є актуальним завданням, яке вирішують багато фахівців.

Показники міцності штукатурних розчинів треба призначати з урахуванням механіки руйнування системи “кладка–штукатурне покриття”, розумінні процесів що перебігають під час його твердіння й експлуатації. Розглянуто процеси, що перебігають під час твердіння штукатурного розчину, механіка руйнування системи “кладка–штукатурне покриття”. На основі розроблених теоретичних передумов дібрано склади штукатурних сумішей на різних видах заповнювачів і наповнювачів (вермікулітовому, з бою газобетону, карбонатному, перлітовому) з високою тріщиностійкістю.

Ключові слова: енергозберігання, автоклавний газобетон, проектування складу, штукатурні розчини, механіка руйнування.

The high cost of energy resources requires applying of energysaving technologies in a build industry. The optimum decision of a wall construction is the use of autoclave aerocrete. At the thickness of wall of 0.4-0.5m, normative thermal resistance for any of region Ukraine is provided.

Application of autoclave aerocrete requires materials and technologies for his defence. Plastering of walls, with the subsequent finishing (decorative plasters, facade paints) is the most effective tekhnik and economy decision. Development of compositions of clout solutions for an autoclave aerocrete and technology of their application, is an actual task which is decided by many specialists.

The parametrs of durability of clout solutions need to be appointed taking into account mechanics of destruction of the system “wall-plaster”, understanding of processes that flow at his hardening and exploitation. In the article the considered processes that flow at hardening of clout solution, mechanics of destruction of the system is “wall-plaster”.

Coming from the developed theoretical pre-conditions, compositions of clout mixtures were neat on the different types of fillers (vermikulit and from the crash of aerocrete, carbonate and pearlitic) with high fracture toughness.

Key words: planning of composition, shtukaturne solutions, mechanics of destruction.

Висока вартість енергоресурсів потребує впровадження енергозберігаючих технологій у будівельне виробництво. Оптимальним рішенням стінової конструкції є використання автоклавного газобетону. За товщини стіни 0,4–0,5 м, забезпечується нормативний термічний опір для будь-якого регіону України.

Широке використання автоклавного газобетону потребує матеріалів і технологій для його захисту. Оштукатурювання стін, з декоративним шаром (декоративні штукатурки, фасадні фарби), є одним, з найефективніших техніко-економічних рішень. Розроблення складів штукатурних розчинів для автоклавного газобетону і технології їх використання, є актуальним завданням, яке вирішують багато фахівців [1–4]. Недоліком розроблених складів є те, що всім їм, тією чи іншою мірою, властиве тріщиноутворення [5, 3], яке приводить до руйнування штукатурного покриття, зниження довговічності стінової.

На нашу думку, це відбувається через те, що під час проектування складу і властивостей, штукатурного покриття, не повною мірою враховують спільність його роботи з газобетонною кладкою. Стінову конструкцію слід розглядати як багатошарову систему, для якої необхідно, залежно від характеристик матеріалу кладки, деформацій кладки і виникаючих напружень у кладці і штукатурному покритті, цілеспрямовано підбирати склад штукатурної суміші, з певними якісними і кількісними параметрами.

Нормативні документи визначають необхідні параметри для штукатурних розчинів, це середня густина, міцність під час стиснення і під час вигину, водопоглинання, морозостійкість, паропроникність, адгезія до стінового матеріалу. У різних нормативних документах вказують різні показники міцності і не обумовлюються вимоги щодо тріщиностійкості для фасадних штукатурок. Не зовсім зрозуміло, з яких передумов випливають вимоги по міцності матеріалу.

Завданням досліджень є розроблення теоретичних і практичних основ спільної роботи газобетонної кладки і штукатурного покриття, на основі яких можна буде проектувати склади штукатурних розчинів з високою тріщиностійкістю. Для визначення, якими параметрами повинно володіти штукатурного покриття, необхідно знати процеси, що перебіг у системі “кладка–покриття” під час нанесення штукатурного розчину на кладку, його твердіння та експлуатації, розуміти механіку руйнування системи.

Розгляд внутрішньоструктурних напружень у штукатурному покритті і контактній зоні, його з кладкою, процесів зародження, нагромадження і розвитку тріщин за циклічних (нагрівання і охолодження, заморожування і розморожування, зволоження і висушування) і силових навантажень, є попередньою умовою в побудові механіки руйнування системи. Це дасть змогу передбачити поведінку системи “кладка–покриття” у часі, розробити рекомендації щодо запобігання деструктивних процесів, підвищенню довговічності штукатурного покриття та стінової конструкції. Використання картини руйнування, розрахунков показників напружено-деформованого стану та інших енергетичних і силових параметрів механіки руйнування, дасть змогу проектувати склади штукатурного розчину з необхідними параметрами міцності і тріщиностійкості.

Руйнування штукатурного покриття пов'язане з нагромадженням і розвитком дефектів у структурі матеріалу (мікро- і макротріщин), які утворюються під час нанесення, твердіння та експлуатації [16, 22]. Особливістю твердіння штукатурного розчину є те, що гідратація цементу перебігає за недостатньої кількості води, через її інтенсивне випаровування і поглинання пористою основою. У цих умовах формується дефектна структура цементного каменю, утворюються нерівноважні, метастабільні полікрісталлічні новоутворення. Твердіння за зниженого В/Ц призводить до неповної реалізації в'язучого потенціалу цементу, падінню міцності, підвищеному тріщиноутворенню і зниженню довговічності затверділого штукатурного покриття [18–20].

Відбувається гідралічна (0,3–0,8 мм/м) та пластична (2–5 мм/м) усадження штукатурного розчину [1, 6–9], а оскільки газобетонна кладка стримує ці деформації, то це призводить до виникнення напружень у штукатурному покритті (δ), які в сім разів перевищують його межу міцності під час розтягування:

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon * E}{1 - \mu},$$

де E і μ – модуль пружності і коефіцієнта Пуассона штукатурного покриття; $\Delta \varepsilon$ – різниця деформацій штукатурки і газобетонної кладки [5]. Через ці напруги і через те, що зменшення ступеня гідратації цементу призвело до зниження граничної розтяжності матеріалу на 20–50 % [3, 5, 10], відбувається тріщиноутворення в штукатурному покритті, на поверхні і в об'ємі матеріалу, (рис. 1, б, в), а також у контактній зоні з газобетонною кладкою (рис. 1, а).

У результаті формується дефектна структура матеріалу, що містить пори, тріщини, і пори, суміщені з тріщинами. Тріщини в штукатурному покритті поширюються в усіх напрямках. У цементному камені вони проходять переважно навколо або через негидратіровані зерна цементу, вздовж кристалів портландіта, які мають схильність до розколювання, а також через пори. Вершини тріщин розташовується близько зерен піску, поблизу вершини тріщин спостерігається безліч мікротріщин. Тріщини мають розгалуження, зигзагоподібні включення довжиною 10 мкм, які також перетинаються. Спостерігаються незруйновані ділянки цементного каменю, які є містками міцності [11, 17].

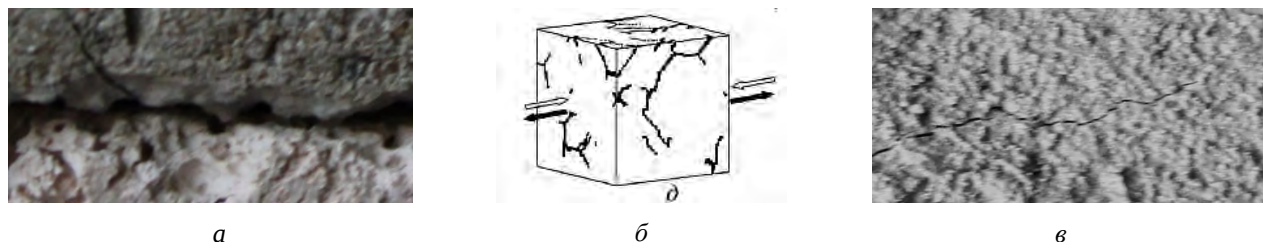


Рис. 1. Тріщиноутворення: а – в контактній зоні “газобетонна кладка–штукатурне покриття”; б – в об’ємі штукатурного розчину; в – на його поверхні

Під час експлуатації на стінову конструкцію і також на штукатурне покриття, впливають комплексні навантаження (силові, температурні, вологісні та корозійні), під впливом яких відбувається розвиток дефектів утворилися в структурі матеріалу на стадії тверднення (рис. 2).

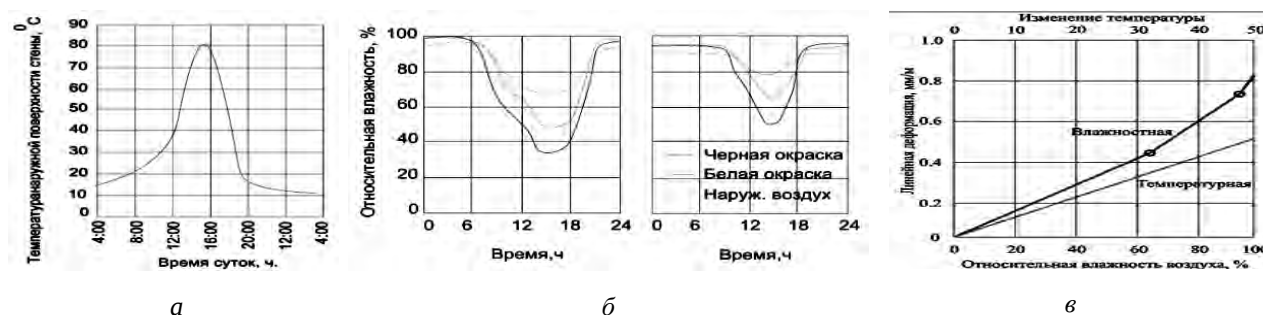


Рис. 2. Температурно-вологісний вплив на стінову конструкцію (а, б) і деформації штукатурного покриття (в)

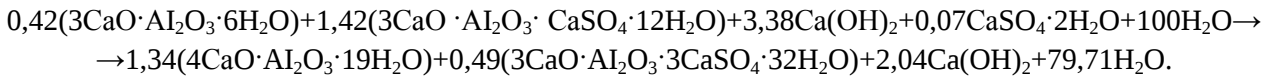
Циклічний температурно-вологісний вплив, призводить до деформації (ΔL_p , ΔL_c , ΔL_{tv}), і додатковим напруженням у матеріалі (δ).

$$\Delta L_p = \alpha \Delta T^p L; \Delta L_c = \alpha \Delta T^c L; \Delta L_{tv} = (\alpha \Delta T L F_m) + (\Delta L_q L),$$

де ΔL_p , ΔL_c – деформації розтягування і стиснення; α – коефіцієнт температурного розширення матеріалу; ΔT – різниця температур; L – довжина стінового елемента; ΔL_{tv} – тепло-вологісні деформації; F_m – показник матеріальних дефектів; ΔL_q – вологісні деформації [3].
 $\delta = \kappa \cdot \sqrt{[\alpha t + b(Lc)]} \delta^* \delta^* = E \cdot \alpha t \cdot \Delta t$, де E – модуль пружності; αt – коефіцієнт лінійного розширення штукатурного покриття; Δt – розрахунковий перепад температур;

Вологісні деформації набухання і усадки, накладаючись на поле температурних деформацій, сприяють розвитку тріщин у матеріалі. Для матеріалу характерна неоднорідність напруженого стану. На кордоні цементної матриці і кварцового заповнювача, двох фаз з різними КТР (коефіцієнтом температурного розширення (α), за зміни температури, виникають стискаючі напруження, що діють на фазу з високим α і розтягуючі, діючи на фазу з меншим α . Локальні напруження особливо великі на вершині тріщини, яка утворилася, де відбувається концентрація напружень, причому вони то більші, що більший їхній розмір. У разі напруженнях понад деяке критичне значення відбувається підростання тріщини.

У разі зволоження штукатурного покриття, менш обводнені гідрати, що утворилися під час твердіння, стають термодинамічно нестабільними і прагнуть до переходу в більш обводнені, стабільні в нових умовах, гідратні фази.



Перекристалізація супроводжується збільшенням об'єма твердої фази (до 45 %), що призводить до значних внутрішніх напружень у матеріалі, що також сприяє розвитку мікротріщин. Концентрація цих мікротріщин зростає, і за досягнення деякого критичного значення утворюються макроскопічні тріщини. Зростання макроскопічних тріщин, проходить через контактну зону з заповнювачем або через цементний камінь залежно від їхньої міцності та наявності дефектів. Коли деформація в вершині тріщин, досягає критичного значення, область руйнується, довжина тріщини зростає, напруга перерозподіляється на сусідні елементи, після чого процес повторюється. Перерозподіляючи деформації і напруги в матеріалі, тріщини з'єднуються, продовжують рости (рис. 3).

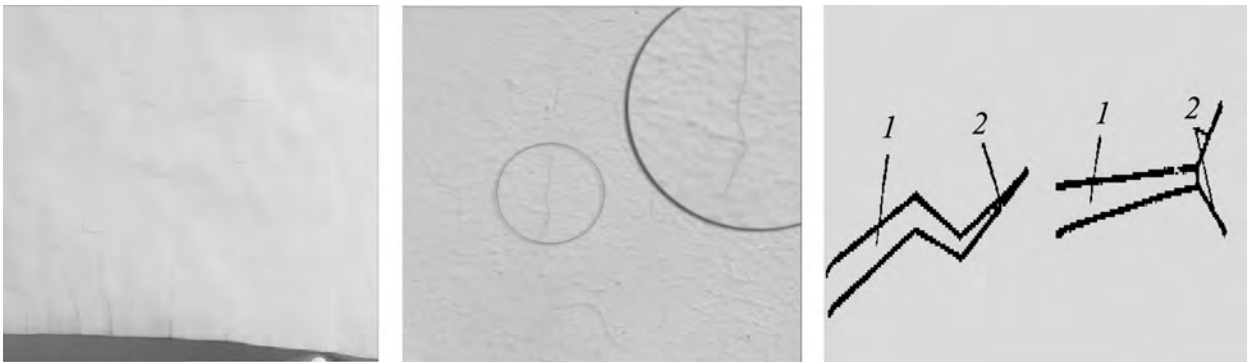


Рис. 3. Розвиток тріщин у штукатурному покритті під час експлуатаційних впливів

Штукатурне покриття не “працює” відокремлено від стінової конструкції, тому на його напружений стан впливають деформації кладки. Деформація кладки відбувається під впливом постійних і тимчасових навантажень, усадження розчину кладки, карбонізації газобетону, зволоження парообразною вологою мігруючої з приміщення і конденсується всередині конструкції, температури і вологості навколишнього середовища, від вітрових навантажень, деформації залізобетонного каркаса [12, 13]. Внаслідок цього стінова конструкція випробовує деформації розтягування і стиснення, вигину з площини (рис. 4, 5). Під час досягнення певного значення розтягуючих навантажень через деформацію кладки, відбувається подальше підростання тріщин у штукатурному покритті і декоративно-захисному шарі (рис. 5, 6).

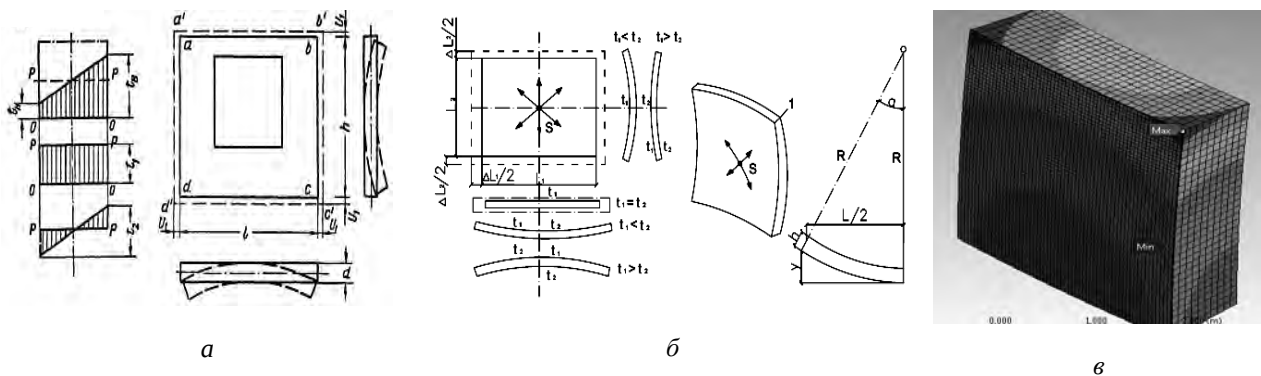


Рис. 4. Деформації стінової конструкції (а, б) і ізополя напружень у ній (в)

Через різницю деформацій и модулів пружності газобетонної кладки і штукатурного покриття, в контактній зоні між ними, виникають деформації (рис. 5, а, рис. 6, а, б) і напруження зсуву (τ) (рис. 6, в), які є причиною зростання магістральної тріщини в контактній зоні (рис. 7).

$$\tau = [\Delta T_1 \alpha_1 - \Delta T_2 \alpha_2] / \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right],$$

де τ – напруга зсуву від температурних деформацій, кгс/см²; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – різниця температури штукатурного покриття і кладки, °С; α_1, α_2 – коефіцієнт термічного розширення кладки і штукатурного покриття; E_1, E_2 – модулі пружності кладки і штукатурного покриття, кгс/см²;

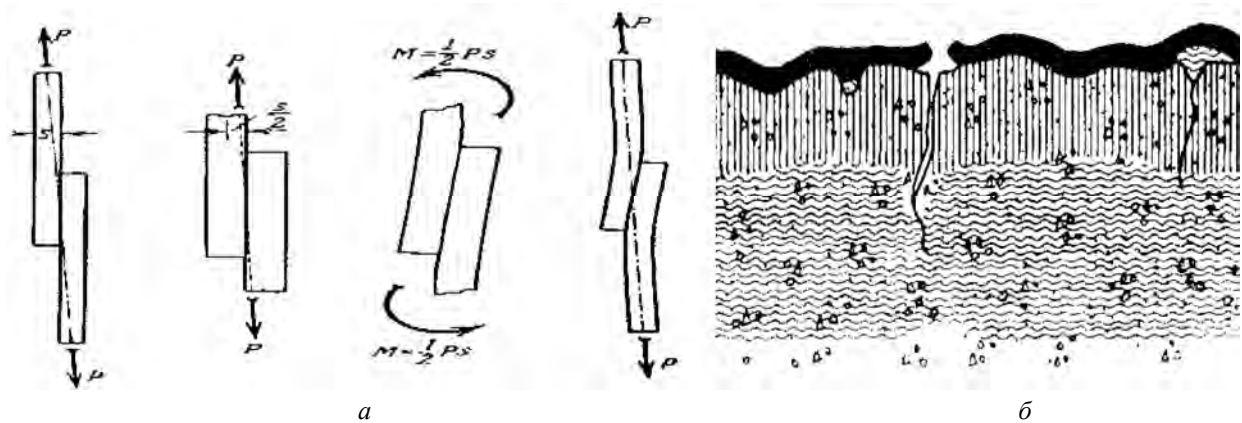


Рис. 5. Деформації стінової конструкції та штукатурного покриття (а), тріщиноутворення в стіновому матеріалі, штукатурному покритті і декоративно-захисному шарі (б)

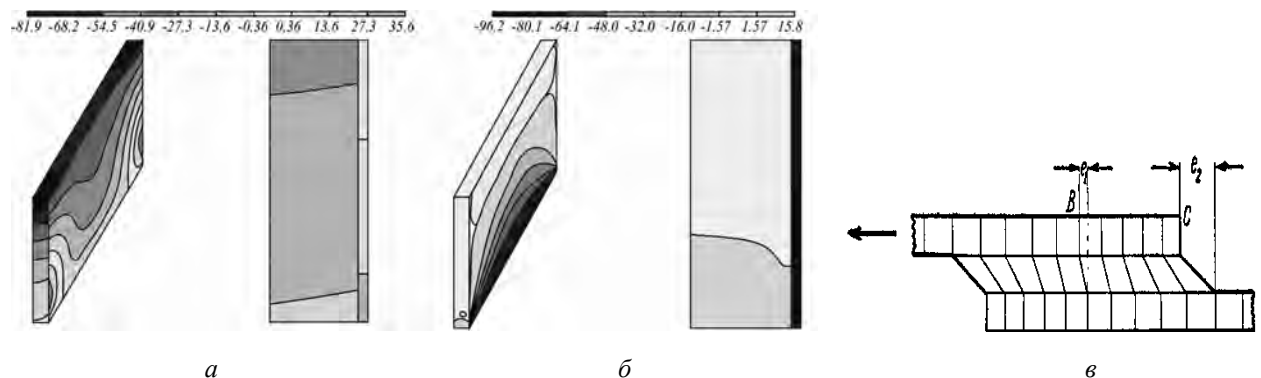


Рис. 6. Температурні деформації (а, в) і напруження (б) в контактній зоні “газобетонна кладка–штукатурне покриття”

Особливістю процесу є те, що магістральна тріщина в контактній зоні розвивається на межі двох різнорідних матеріалів з відмінними властивостями – газобетонній кладці і штукатурці (рис. 7). Для системи “кладка–штукатурні покриття” характерно втомне руйнування, за порівняно низького рівня напруження і частою їхньою циклічністю, яке проводить до проростання магістральної тріщини в контактній зоні між штукатуркою і кладкою і сімейства магістральних тріщин у штукатурному покритті зі швидкістю (dl/dN):

$$dl/dN = A(\Delta K)^n,$$

де A і n – емпіричні коефіцієнти, $n = 2-7$, із збільшенням крихкості матеріалу, n збільшується; $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ перепад коефіцієнта інтенсивності напружень за один цикл; N – кількість циклів.

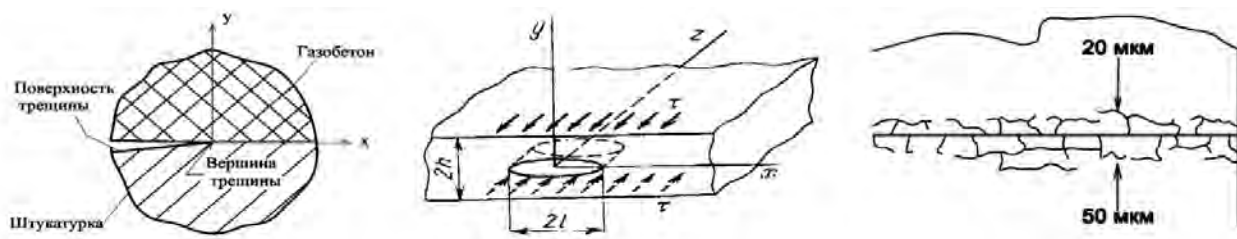


Рис. 7. Розвиток магістральної тріщини в контактній зоні “газобетонна кладка-штукатурне покриття”

Руйнування адгезійного з’єднання не відбувається відразу по всій поверхні. Через те, що напруги в контактній зоні розподілені нерівномірно, ділянки, котрі піддаються вищим напруженням, руйнуються передовсім, зменшуючи так міцність усієї контактної зони загалом. Старт і зростання магістральної тріщини в контактній зоні визначається станом і процесами біля її вершини, і реалізується за механізмом, який охоплює розвиток мікротріщин у зоні передруйнування та їх об’єднання в макротріщини. Основною причиною її розвитку є зміна деформацій і напружень у вершині тріщини, що виникають під час зволоження і висушування, нагрівання й охолодження стінової конструкції і штукатурного покриття. У вершині мікротріщини концентрується напруга. Поки рівень напружень менший від граничного значення адгезійної або когезійної міцності, тріщина не росте. Якщо під час подальшого зростання зовнішнього навантаження, деформації та напруги в вершині тріщини перевершають граничний рівень, відбудеться її підростання (рис. 7).

На зворотному ході циклу навантажування (зниження температури або вологості), відбувається часткове відновлення геометрії вершини тріщини та розміру пружнопластичної зони, проте надалі тріщина збільшує свою довжину. Зі зростанням тріщини зростає і напруга в її вершині, і коли розмір тріщини досягає критичних розмірів, а напруга в вершині тріщини перевершує поверхневу енергію руйнування речовини, то відбувається некероване руйнування контактної зони і відшарування штукатурного покриття від газобетонної кладки. Виникнення і зростання тріщин може відбуватися як безпосередньо на кордоні контакту кладки з штукатурним покриттям, так і в штукатурному покритті або газобетонній кладці, що визначається співвідношенням величин адгезії між ними до величини їхньої когезії. Що нижча адгезія і вища когезія, то більша ймовірність руйнування контактної зони безпосередньо по межі – адгезійний характер руйнування (рис. 8).

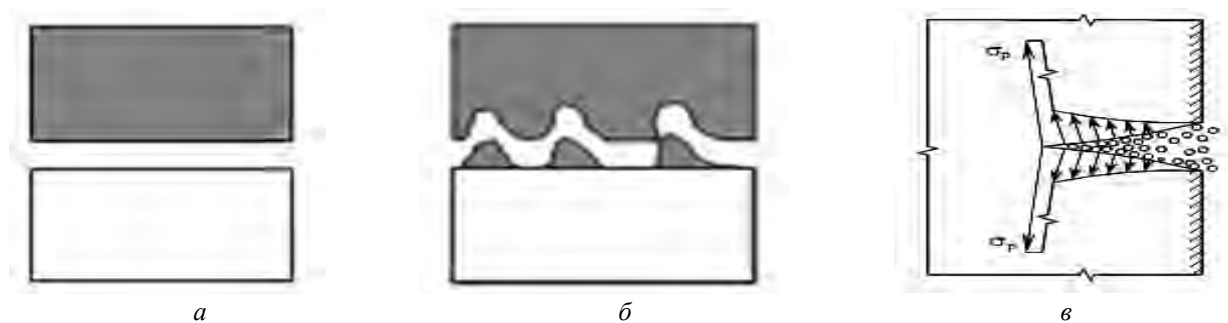


Рис. 8. Види руйнувань у контактній зоні “газобетонна кладка-штукатурне покриття”:
а – адгезійне; б – змішане; в – розклинювальна дія водних плівок у магістральній тріщині

Руйнування інтенсифікується через наявність вологи, агресивних рідин і газів, низьких температур. Волога, проникаючи в вершину тріщин штукатурного покриття, і контактної зони “кладка-покриття” створює розклинюючий тиск, який сприяє розвитку тріщин (рис. 8, в). Під час випаровування вологи, розклинювальні сили перестають діяти і в матеріалі виникають напруги усадки. Зі збільшенням вологості навколишнього повітряного середовища матеріал знову зволожується, а тріщини розкриваються і розвиваються.

Руйнування інтенсифікується через вплив на стінову конструкцію агресивних газів і рідин (окису вуглецю, двоокису сірки, азотних сполук та ін.). Так SO_3 , з’єднуючись з атмосферною вологою,

перетворюється на сірчану кислоту, а потім у вигляді іонів SO_4 руйнує силікати кальцію і карбонатні сполуки в штукатурці і кладці. У тріщинах утворюються продукти корозії, які надають розклинювальний вплив, що також сприяє розвитку магістральних тріщин у штукатурному розчині і контактній зоні.

Ще одним з видів руйнівної дії зовнішнього середовища під час експлуатації стінової конструкції є багаторазове заморожування і розморожування. Замерзаюча в тріщинах штукатурного покриття і контактної зони волога збільшується в об'ємі, зумовлюючи значні напруги в вершині тріщини, що призводить до її підростання [7]. У результаті вищеописаних процесів відбувається руйнування штукатурного покриття і відшарування його від газобетонної кладки (рис. 9).

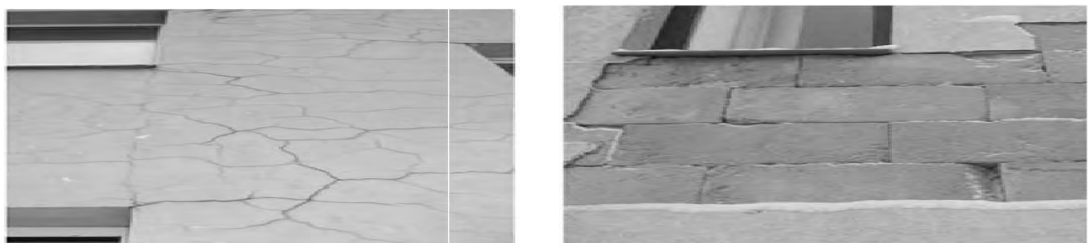


Рис. 9. Руйнування і відшарування штукатурного покриття від газобетонної кладки [22]

Для того, щоб запобігти тріщиноутворенню в системі “кладка-штукатурне покриття”, проектування штукатурних розчинів необхідно вести з урахуванням процесів, які відбуваються під час нанесення і твердіння розчину і напружень, що виникають у штукатурному покритті через деформацій стінової конструкції і самого покриття. Необхідно мінімізувати кількість усадкових тріщин, які виникають у покритті під час нанесення і твердіння. Міцність під час розтягування розчину, його деформативність і контактної зони, повинна забезпечувати високу тріщиностійкість штукатурного покриття та контактної зони. Тільки в цьому випадку можна буде забезпечити високу довговічність штукатурного покриття та стінової конструкції загалом.

Метою досліджень є отримання штукатурних розчинів з високою тріщиностійкістю, зі забезпеченням вимог нормативних документів по середній густині, міцності під час стиснення і вигину та інших параметрів. Це забезпечить оптимальні умови роботи системи “газобетонна кладка-штукатурні покриття”, високу довговічність стінової конструкції. На основі вищезазначених теоретичних передумов підібрано склади штукатурних сумішей на різних видах заповнювачів і наповнювачів – вермікулітового і з бою газобетону (суміш № 1), карбонатному і перлітовому (суміш № 2). Для оптимізації рецептурно-технологічних параметрів використовували п’ятифакторний експеримент з наступними варійованими факторами (див. таблицю).

Діапазон варіювання факторів

Вид суміші	Діапазон вар'ювання	Кількість вяжучого, кг/м ³	Кількість заповнювача і наповнювача, м ³ /м ³	Кількість фібри, кг/м ³	Кількість рідиспергірувального полімерного порошка Vinnapas 5043 H, %	Кількість Tylose MBZ 15009, %
		X1	X2	X3	X4	X5
Суміш № 1	1	500	1,05/1	1,2	5	0,5
	0	400	1,05/1	0,9	3	0,3
	-1	300	1,05/1	0,6	1	0,1
Суміш № 2	1	400	1,05/1	1,2	5	0,5
	0	300	1,05/1	0,9	3	0,3
	-1	200	1,05/1	0,6	1	0,1

Для визначення властивостей штукатурного розчину виготовляли зразки розміром 40×40×160 мм, які формували на газобетонному блоці. Режим твердіння повітряно-сухий, що моделює роботу штукатурного покриття в реальних умовах. Після 28 діб твердіння визначали основні фізико-механічні властивості: міцність під час стиснення і вигину, середню густину та ін. Тріщиностійкість визначали якісно, візуально, за наявності тріщин в покритті, і кількісно, розраховуючи відношення міцності у разі вигину до міцності під час стиснення.

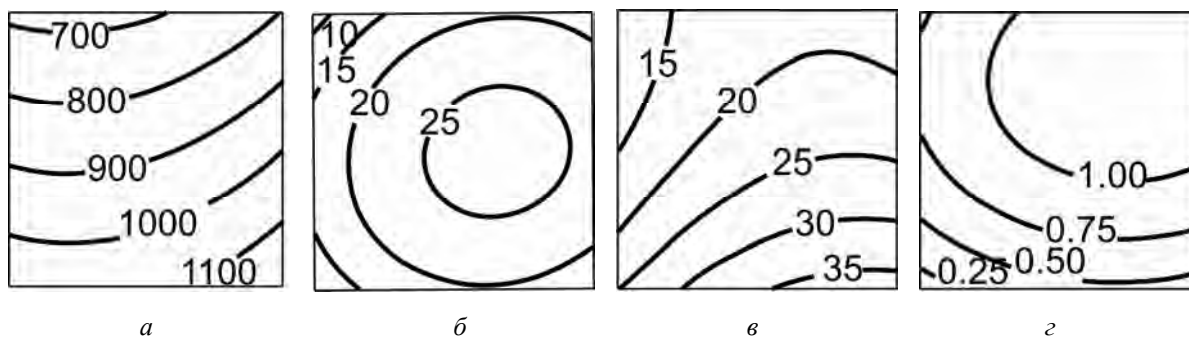


Рис. 10. Середня густина (а), міцність на вигин (б), міцність на стиск (в), коефіцієнт тріщиностійкості (з) суміші № 2

У результаті отримано штукатурку, яка дає змогу забезпечити спільність роботи газобетонної кладки з штукатурним покриттям і так високу довговічність стінової конструкції. Основні фізико-механічні характеристики штукатурки з суміші № 2: середня густина 700–1100 кг/м³, міцність у разі вигину 10–25 кг/см², міцність у разі стиснення 15–35 кг/см², коефіцієнт тріщиностійкості 0,25–1 (рис. 10, а–з); Для суміші № 1: середня густина 600–1500 кг/м³, міцність у разі вигину 12–18 кг/см², міцність у разі стиснення 18–36 кг/см², коефіцієнт тріщиностійкості 0,56–0,74 (рис. 11, а–з).

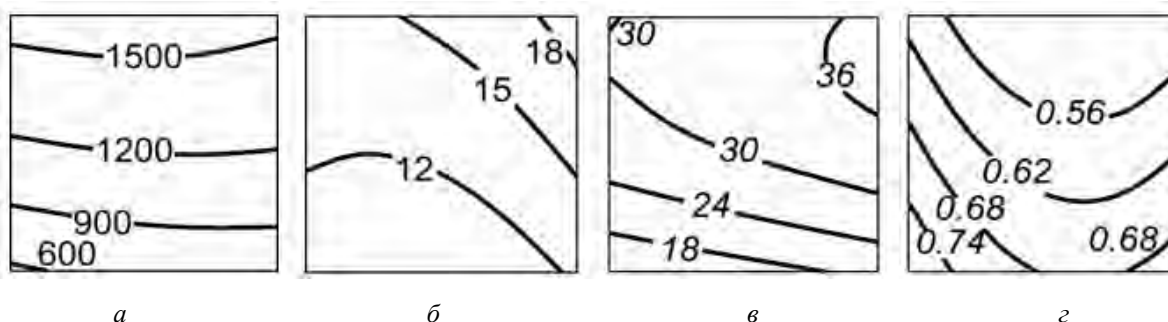


Рис. 11. Середня густина (а), міцність на вигин (б), міцність на стиск (в), коефіцієнт тріщиностійкості (з) суміші № 1

Отримані штукатурні розчини задовольняють вимогам нормативних документів за середньою густиною (600–1600 кг/м³), міцності у разі вигину (10–25 кг/см²) і стиску (25–50 кг/см²). Штукатурне покриття має високу тріщиностійкість, коефіцієнт тріщиностійкості становить 0,25–1, тоді як тріщиностійкою вважається штукатурка з показником більше ніж 0,26.

Наведені дані свідчать про те, що цілеспрямованою модифікацією штукатурної суміші, можна отримати штукатурного покриття з високою тріщиностійкістю і забезпечити оптимальні умови спільної роботи системи “газобетонна кладка-штукатурне покриття”. Це, своєю чергою, забезпечить підвищення довговічності стінової конструкції.

Висновки

1. Під час проектування параметрів міцності і тріщиностійкості штукатурних розчинів необхідно базуватися на механіці руйнування системи “кладка-штукатурне покриття”. Призначати конкретні вимоги щодо міцності на стиск, вигин і тріщиностійкість, враховуючи напруження, що виникають у штукатурному покритті під час твердіння та експлуатаційних впливів.

2. Забезпечити необхідні властивості штукатурних розчинів можливо шляхом цілеспрямованої модифікації, тобто введенням редиспергуючих полімерних порошоків, ефірів целюлози, низькомодульних заповнювачів, мікродисперсійним армуванням.

3. У результаті цілеспрямованої модифікації отримані штукатурні розчини із середньою густиною 600–1500 кг/м³, міцністю у разі вигину 10–25 кг/см², міцністю на стиск 15–36 кг/см², що відповідає

вимогам нормативних документів. Матеріал має високу тріщиностійкість, коефіцієнт тріщиностійкості 0,25-1, що забезпечить високу довговічність штукатурного покриття та стінової конструкції.

1. Особенности технологии возведения и эксплуатации наружных стен из автоклавного газобетона / В. А. Парута, Ю. А. Семина, Е. А. Столяр, А. В. Устенко, Е. В. Брынзин // *Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века.* – М., 2012. – № 12. – С. 35–39.
2. Гранау Э. Предупреждение дефектов в строительных конструкциях / Э. Гранау. – М. : Стройиздат, 1980. – С. 217.
3. Сажнева Н. Н. Защитные системы для отделки ячеистого бетона пониженной плотности / Н. Н. Сажнева, Н. П. Сажнев, Е. А. Урецкая // *Строительные материалы.* – 2009. – № 1. – С. 17–19.
4. Халимов Р. К. Исследование совместной работы строительных материалов в составе современных многослойных теплоэффективных наружных стен зданий : дисс. ... канд. техн. наук: специальность: 05,23.05 – *Строительные материалы и изделия*; Уфа, 2007. 178 с.
5. Паплавскис Я. Требования к штукатурным составам для наружной отделки стен из ячеистых бетонов. Проблемы эксплуатационной надежности наружных стен на основе автоклавных газобетонных блоков и возможности их защиты от увлажнения. Штукатурные составы для наружной отделки стен из газобетона / Я. Паплавскис, А. Фрош // *материалы семинара; под ред. Н. И. Ватина.* – СПб. : Изд-во. Политехнического ун-та, 2010. – С. 10–15.
6. Горшков А. С. Оценка долговечности стеновой конструкции / А. С. Горшков, М. В. Кнатько, П. П. Рымкевич // В сб. “Однослойные ограждения из автоклавного газозобетона в современном домостроении”. – Екатеринбург, 2009. – С. 12–16.
7. Cotterell Brian, Mai Yiu-Wing. Crack Growth Resistance Curve and Size Effect in the Fracture of Cement Paste. Кривая сопротивления росту трещин и масштабный эффект при разрушении цементного камня // *J. Mater. Sci.*, – 1987. – № 8. – Р. 2734–2738.
8. Комохов П. Г. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона / П. Г. Комохов, В. П. Попов. – Самара : “Строительство” РИА, 1999. – 111 с.
9. Емельянов А. А. Повреждения наружных панелей жилых полносборных зданий при температурных деформациях по данным натурных исследований. // *Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций* / А. А. Емельянов; под ред. А. А. Шишкина. – М. : Стройиздат, 1964. – Вы. 2. – С. 153–177.
10. Struble L. Microstructure and Fracture at the Cement Paste-Aggregate Interface. Микроструктура и трещинообразование на поверхности раздела между цементным камнем и заполнителем // *Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987.* – Pittsburgh (Pa), – 1988. – Р. 11–20.
11. Галкин С. Л. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика / С. Л. Галкин, Н. П. Сажнев, Л. В. Соколовский, Н. Н. Сажнева. – Минск : Стринко, 2006. – 448 с.
12. Struble L. J. Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened Cement Paste: [Pap.] 1st Symp. Rel. Multilayer Ceram. Capacitors, University Park, Pa, May 11–12, 1989. Структурные аспекты разрушения цементного камня / L. J. Struble, P. E. Stutzman, E. R. Fuller // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1989. – № 12. – Р. 2295–2299.
13. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1979. – 503 с.
14. Дорофеев В. С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В. С. Дорофеев, В. Н. Выровой. – Одесса, 1998. – 168 с.
15. Schneider U., Dumat F. Strukturbeeinflussung zementgebundener Baustoffe mittels Mikrowellen / U. Schneider, F. Dumat // *Betontechnik*, 9. – 1988. – С. 2. – Р. 44–46.
16. Powers T. S. A Hypothesis on carbonation shrinkage. *Journal of Portland Cement Association* / T. S. Powers. – Research Development Laboratoru. 1962. – V. 4, № 2. – Р. 26–31.
17. Vasicek J. Trvanlivost a odolnost autoklavovanych porovitych betonu pri posobení susnych vnejsich jevu / J. Vasicek. – Stavivo, 1965. – № 6. – Р. 24–28.
18. Homann M. Richtig Bauen mit Porenbeton / M. Homann. – Stuttgart, 2003. – 268 p.
19. Helmut Künzel. Außenputz. Untersuchungen, Erfahrungen, Überlegungen, Fraunhofer IRB Verlag, 2003. – Р. 23–27.
20. Herman H. Advances in Thermal Spray Technology / H. Herman // *Advanced Materials & Processes.* – 1990. – № 4. – Р. 41–45.
21. Celarie F. Glass breaks like metal, but at the nanometer scale / F. Celarie, S. Prades, D. Bonamy, L. Ferrero, E. Bouchaud, C. Gulliot, C. Marliere // *Physical Review Letters.* – 2003. – Vol. 90 (7). – Р. 075504/1–075504/4.
22. Гринфельд Г. И. Инженерные решения обеспечения энергоэффективности зданий. Отделка кладки из автоклавного газобетона : учеб. пособие / Г. И. Гринфельд. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 130 с.