

АНОТАЦІЯ

Тихонюк С.А. Ремонтні штукатурні композиції для будівель з вапняку-черепашнику. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». - Одеська державна академія будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2025.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню штукатурної суміші на зологіпсоцементному в'язучому для ремонту стін будівель з вапняку-черепашнику. Більшість історичних будівель міста складено з місцевого природного каменю вапняку-черепашнику, який наряду з досить гарними технічними і експлуатаційними характеристиками міцності, тепло- і шумозахисту, має суттєвий недолік - втрату міцності при його зволоженні, що призводить до зниження несучої здатності та руйнації конструкції. Однією з головних причин надмірного зволоження черепашнику є пошкодження або відсутність штукатурного шару на стінах будівель. Потреба у створенні вітчизняної недорогої ремонтно-реставраційної суміші із заданими властивостями спеціального цільового призначення - для ремонту стін будівель з вапняку-черепашнику викликана необхідністю збереження історичних будівель як об'єктів архітектурної та культурної спадщини, а також як значної частини житлового фонду південних районів України. Вимоги, що висуваються до розроблюваної штукатурної суміші, продиктовані особливостями черепашнику як будівельного матеріалу (його хімічним складом, пористою структурою і фізико-механічними характеристиками): це - сумісність матеріалів, високі водостійкість і адгезія, узгоджені з матеріалом основної стіни паропроникність і деформативні властивості. Важливою властивістю штукатурної суміші для зовнішніх робіт є швидке твердіння.

Перспективними в'язучими для таких штукатурних сумішей видаються гіпсоцементні в'язучі з додаванням золи як пуцоланової добавки.

В роботі розглядалися наступні завдання:

- вибрати вихідні компоненти для планованого експерименту по підборі базового складу штукатурної суміші;
- визначення фізико-технічних властивостей зразків черепашника і дослідних зразків суміші, виготовлених за обраним планом експерименту;
- за результатами математичного моделювання визначити вплив окремих компонентів на міцнісні властивості, водостійкість і адгезійну міцність зологіпсоцементної суміші (ЗГЦС) і прийняти рішення про її базовий склад;
- визначення паропроникності штукатурної суміші та черепашника;
- дослідити роль армування суміші фіброволокнами при вологих деформаціях;
- провести дослідно-промислову апробацію отриманого складу.

Дослідженням піддавались зразки черепашника, відібрані з пошкоджених будівель міста, дослідні зразки зологіпсоцементної суміші з додаванням вапна, що виготовлені за прийнятим планом експерименту, і зразки базового складу суміші, встановленого за результатами математичного моделювання властивостей.

Дослідження виконувалися з використанням методів планування експериментів та експериментально-статистичного моделювання. Визначення нормальної густоти та термінів схоплювання гіпсовміщуючої суміші, міцності затверділої композиції, водостійкості і паропроникності здійснювалися за стандартами та згідно з чинними нормами. Міцність зчеплення штукатурної суміші з поверхнею черепашника і керамічної плитки визначалася за допомогою розробленого на кафедрі ПАТСМ вимірювального пристрою. Лінійні вологісні деформації зразків визначались за допомогою оптичного вимірювального мікроскопу УІМ 21.

На основі аналізу наявної інформації були обрані вихідні компоненти швидкотвердіючої водостійкої штукатурної суміші – будівельний гіпс Г5, цемент (клінкер), зола-винос ТЕС в якості пуцоланової добавки і гашене вапно. Зразки виготовлені за трифакторним планом експерименту В₃. Відносно постійної кількості гіпсу варіювались три чинники: кількість

цементу (40 - 60%), вапна (40 - 60%) і золи (20 – 60%). Водотверде відношення, підібране за нормальною густиною суміші, дорівнювало 0,6. Дослідні зразки виготовлені в потрібних формах у вигляді стандартних балочок розміром 40x40x160 мм.

Визначена міцність висушених зразків суміші при вигині і стиску у віці 7 і 28 діб. Межа міцності при стиску деяких з виготовлених зразків у віці 28 діб досягає майже 10 МПа, а при вигині - 4 МПа (для порівняння - міцність на стиск зразків черепашника, відібраних з кладки пошкоджених будівель, складає від 1,5 до 2,5 МПа). Збільшення міцності суміші через 28 діб порівняно з міцністю через 7 діб становить близько 30 відсотків.

За результатами математичного моделювання з'ясовано вплив компонентів ЗГЦ суміші на міцнісні та інші характеристики зразків. Найбільш суттєво і негативно на міцність впливає вапно (в досліджуваному інтервалі вмісту), причому не тільки в ранній термін твердіння, але і у віці 28 діб. Цемент підвищує міцність складу. Вміст золи впливає на міцність відносно несуттєво.

Водостійкість дослідних зразків оцінювалась за двома критеріями: загальноприйнятим коефіцієнтом розм'якшення K_p та запропонованим на кафедрі міського будівництва та господарства ОДАБА – індексом водостійкості $I_v = R_{\text{вол}}^2 / R_{\text{сух}}$, у якому підсилена роль міцності у вологому стані, як більш значущої при виборі матеріалу для зовнішніх штукатурних робіт. Коефіцієнт розм'якшення неоднозначно відображає фактичну водостійкість матеріалу; встановлено його залежність від умов вимірювання міцностей у водонасиченому та сухому станах. В деяких випадках матеріали з меншою міцністю можуть мати більший K_p , ніж матеріали з більшою міцністю. Індекс водостійкості I_v , в якому превалює міцність матеріалу у водонасиченому стані, є більш коректним критерієм.

Водостійкість визначалася після 2 і після 48 годин зволоження зразків у віці 7 і 28 діб. Зниження міцності зразків після 48 годин зволоження, у порівнянні з двогодинним зволоженням, становило в середньому 30 відсотків.

Проте мінімальна міцність зразків після 48 годин насичення водою була в межах 2,5÷4,5 МПа, що перевищує міцність вапняків-черепашників навіть у природно-вологодому стані.

За результатами аналізу математичних моделей міцності у вологодому стані $R_{вол}$ і критеріїв K_r та I_v , які визначені за різних умов твердіння і зволоження, з'ясовано вплив окремих компонентів – цементу, вапна і золи на водостійкість суміші. Найбільший вплив на підвищення водостійкості ремонтної композиції на ГЦП в'язучому чинить цемент; наступний за значимістю компонент суміші - зола, з підвищенням вмісту якої (в досліджуваному інтервалі) водостійкість зростає; вапно, в досліджуваному інтервалі його вмісту в суміші, знижує стійкість штукатурної композиції до води.

Досліджено ефективність ряду гідрофобізуючих добавок на водопоглинання і водостійкість гіпсу і гіпсовмісної суміші. Найбільш ефективним з розглянутих гідрофобізаторів виявився ГКЖ-11К вітчизняного виробництва, при застосуванні якого водопоглинання гіпсового каменю зменшується на 72% по відношенню до контрольного складу (без добавок). Введення гідрофобізуючої добавки дозволяє підвищити коефіцієнт розм'якшення гіпсу з 0,4 (контрольний склад) до 0,51. Застосування добавки ГКЖ-11К для гідрофобізації штукатурної суміші на основі ЗГЦВ за умов 7-добового твердіння і 48-годинного зволоження дозволило отримати матеріал з $K_r = 0,82$. За результатами вимірювань і моделювання водостійкості зроблено висновок про принципову можливість використання сумішей на ЗГЦ в'язучих для штукатурних робіт на фасадах будівель з вапняку-черепашнику.

Оцінено адгезійну здатність запропонованих штукатурних складів до опорних поверхонь з вапняку-черепашнику методом «відриву кільця». Встановлено, що адгезія дослідних зразків суміші до опорних поверхонь черепашнику, які попередньо не оброблені ґрунтовкою, коливається у досить великому інтервалі – від 0,1 до 0,57 МПа. Аналіз експериментальних даних і моделювання міцності зчеплення суміші показав, що найбільша адгезія штукатурної суміші до вапняку (більш 0,4 МПа.) забезпечується при

середньому, в досліджуваному факторному просторі, вмісті цементу, максимальному вмісті вапна і мінімальному вмісті золи.

Підвищити міцність зчеплення штукатурної суміші з матеріалом основної стіни можливо за рахунок використання адгезійних добавок. Досліджено вплив адгезійної добавки Ceresit CC 81 на міцність зчеплення штукатурної суміші з поверхнею черепашнику і більш однорідною поверхнею керамічної плитки. Введення добавки до складу штукатурної суміші у кількості 3 - 10% збільшує адгезійну міцність, порівняно з бездобавочною, - в 1,3 - 2 рази відповідно до будь-якої опорної поверхні, що досліджені.

Виконано перевірку узгодження паропропускної здатності вапняку-черепашнику і пропонованої штукатурної суміші. Коефіцієнт паропроникності зразків черепашника, відібраних з існуючих будівель змінювався від 0,067 до 0,081 мг/м·год·Па; коефіцієнт паропроникності дослідних зразків ЗГЦ суміші коливається в межах 0,078 - 0,087 мг/м·год·Па, тобто досліджувані матеріали співставні і сумісні за цією характеристикою.

Перевірка можливості випадання конденсату всередині стіни з черепашнику, поштукатуреної запропонованим ЗГЦВ складом, за допомогою спеціальної програми довела, що така ймовірність відсутня.

Враховуючі отримані експериментальні дані і результати математичного моделювання властивостей про негативний вплив вапна на міцність і водостійкість штукатурної композиції, прийнято рішення про виключення вапна зі складу суміші в подальших дослідженнях. Базовий склад зологіпсоцементної штукатурної суміші прийнято у такій комбінації компонентів (мас.%): гіпс – 50, цемент – 30, зола – 20.

Досліджено вплив армування базового зологіпсоцементного штукатурного складу базальтовими та поліпропіленовими волокнами на його міцність, водостійкість і деформативні властивості. Встановлено, що введення армуючих волокон підвищує міцність на вигин в сухому стані в 1,2 – 1,4 рази, а міцність при стиску в сухому стані в 1.35 – 1,5 разів. Міцність зволжених зразків, армованих волокнами, збільшилась в 1.3 рази порівняно з

бездобавочними. Коефіцієнт розм'якшення зразків, армованих волокнами перевищує 0,8.

З'ясовано вплив армуючих волокон на величину вологісних деформацій зразків штукатурної суміші у порівнянні зі зразками черепашника.

Відносна усереднена деформація балочок суміші без фібри в трьох циклах зволоження – висушування дорівнює 0,7%, тобто перевищує деформацію зразків черепашника (0,45%). Відносна деформація зразків армованої фіброволокнами суміші (0,46%) збігається з величиною деформацій черепашника, отже армування штукатурної суміші є необхідною операцією. Відмічено практично однаковий ефект зниження вологісних деформацій суміші при введенні як базальтових, так і поліпропіленових волокон, що дозволяє вибирати тип фібри за іншими критеріями, наприклад з економічних міркувань.

Подовження технологічного часу життєздатності штукатурної суміші на основі гіпсу здійснюється за допомогою поширеного і відносно дешевого сповільнювача - лимонної кислоти. Досліджено вплив лимонної кислоти на терміни схоплювання зологіпсоцементної суміші. Введення лимонної кислоти в кількості 0,12% від маси в'язучих відтерміновує початок схоплювання суміші до 26 хвилин, що є достатнім з точки зору технологічності штукатурних робіт.

Виконані експериментальні дослідження повністю підтверджують гіпотезу про можливість використання зологіпсоцементних в'язучих в штукатурних сумішах для ремонтних робіт на фасадах будівель з вапняку-черепашнику.

За результатами дисертаційної роботи запропонована штукатурна композиція була використана для ремонту стіни в'їзної дворової арки площею 32,5 м² житлового 3-поверхового будинку з вапняку-черепашнику, розташованого у Приморському районі м. Одеси.

Ключові слова: вапняк-черепашник, ремонт, штукатурна композиція, гіпс, цемент, вапно, зола, фібра, добавки.

ABSTRACT

Tykhoniuk S.A. Repair plaster compositions for buildings made of limestone-shell rock. - Copyrighted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 “Construction and Civil Engineering”. – Odesa State Academy of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental study of plaster mixture on an ash and gypsum cement binder for repairing the walls of buildings made of limestone-shell rock. Most of the city's historic buildings are made of local natural limestone-shell rock, which, along with fairly good technical and operational characteristics of strength, heat and noise protection, has a significant drawback - loss of strength when it is moistened, which leads to a decrease in bearing capacity and structural destruction. One of the main reasons for excessive moisture in shell rock is the damage or absence of a plaster layer on the walls of buildings. The need to create a domestic inexpensive plaster mixture with specified properties for a special purpose - for repairing the walls of limestone-shell rock buildings - is caused by the need to preserve historical buildings as objects of architectural and cultural heritage, as well as a significant part of the housing stock in the southern regions of Ukraine. The requirements for the developed plaster mixture are dictated by the peculiarities of coquina as a building material (its chemical composition, porous structure and physical and mechanical characteristics): it is the compatibility of materials, high water resistance and adhesion, vapor permeability and deformation properties coordinated with the material of the main wall. An important property of plaster mixes for exterior works is fast curing.

Gypsum-cement binders with the addition of fly ash as a pozzolanic additive seem to be promising binders for such plaster mixtures.

The following tasks were considered in the work:

- selection of the initial components for the planned experiment on the selection of the basic composition of the plaster mixture;

- determination of the physical and technical properties of shell rock samples and experimental samples of the mixture made according to the selected experimental plan;

- based on the results of mathematical modeling, determine the effect of individual components on the flexural and compressive strength, water resistance and adhesive strength of the ash and gypsum cement mixture (AGCM) and make a decision on its basic composition;

- determine the vapor permeability of the plaster mixture and shell rock;

- to study the role of fiber reinforcement of the mixture under wet deformation;

- conduct pilot testing of the resulting composition.

The research included samples of shell rock taken from damaged buildings in the city, experimental samples of an ash and gypsum cement mixture with the addition of lime, made according to the adopted experimental plan, and samples of the basic composition of the mixture, established by the results of mathematical modeling of properties.

The research was carried out using the methods of experimental design and experimental and statistical modeling. The determination of the normal density and setting time of the gypsum-containing mixture, the strength of the hardened composition, water resistance, and vapor permeability was carried out according to standards and in accordance with applicable regulations. The adhesion strength of the plaster mixture to the surface of shell rock and ceramic tiles was determined using an optical measuring microscope UIM 21.

Based on the analysis of the available information, the initial components of the fast-setting waterproof plaster mixture were selected - G5 construction gypsum, cement (clinker), fly ash from thermal power plants as a pozzolanic additive, and slaked lime. The samples were made according to the three-factor experiment plan B_3 . Relative to a constant amount of gypsum, three factors were varied: the amount of cement (40 - 60%), lime (40 - 60%) and fly ash (20 - 60%). The water-solid ratio, selected from the normal density of the mixture, was 0.6. The prototypes were made in triple molds in the form of standard beams measuring 40x40x160 mm.

The strength of the dried mixture samples in bending and compression at the age of 7 and 28 days was determined. The compressive strength of some of the manufactured samples at the age of 28 days reaches almost 10 MPa, and in bending - 4 MPa (for comparison, the compressive strength of shell rock samples taken from the masonry of damaged buildings ranges from 1.5 to 2.5 MPa). The increase in the strength of the mixture after 28 days compared to the strength after 7 days is about 30 percent.

Based on the results of mathematical modeling, the influence of the components of the AGC mixture on the strength and other characteristics of the samples was determined. Lime (in the studied content range) has the most significant and negative effect on strength, not only at the early stage of curing but also at the age of 28 days. Cement increases the strength of the composition. The ash content has a relatively minor effect on strength.

The water resistance of the prototypes was evaluated according to two criteria: the generally accepted softening coefficient K_r and the water resistance index $I_w = R^2_{wet}/R_{dry}$, proposed by the Department of Urban Construction and Management of the OSACA, which emphasizes the role of strength in the wet state as more significant when choosing a material for exterior plastering. The softening coefficient ambiguously reflects the actual water resistance of the material; its dependence on the conditions of measuring strength in the water-saturated and dry states has been established. In some cases, materials with lower strengths may have a higher K_r than materials with higher strengths. The water resistance index I_w , in which the strength of the material in the water-saturated state prevails, is a more correct criterion.

The water resistance was determined after 2 and 48 hours of moistening of the samples at the age of 7 and 28 days. The decrease in strength of the samples after 48 hours of moistening, compared to two hours of moistening, was on average 30 percent. However, the minimum strength of the samples after 48 hours of water saturation was in the range of 2.5÷4.5 MPa, which exceeds the strength of shell limestone even in the naturally wet state.

Based on the results of the analysis of mathematical models of wet strength R_{wet} and the criteria K_r and I_w , which were determined under different conditions of hardening and moistening, the influence of individual components - cement, lime, and fly ash - on the water resistance of the mixture was found. Cement has the greatest influence on increasing the water resistance of the repair composition on the AGC binder; the next most important component of the mixture is ash, with an increase in its content (in the studied interval), the water resistance increases; lime, in the studied interval of its content in the mixture, reduces the resistance of the plaster composition to water.

The effectiveness of a number of water-repellent additives on the water absorption and water resistance of gypsum and gypsum mix was investigated. The most effective of the considered water repellents was GKZh-11K of domestic production, the use of which reduces the water absorption of gypsum stone by 72% compared to the control composition (without additives). The introduction of a hydrophobic additive allows to increase the gypsum softening coefficient from 0.4 (control composition) to 0.51. The use of the additive GKZh-11K for hydrophobization of the plaster mixture based on AGC binders under the conditions of 7-day curing and 48-hour moistening allowed to obtain a material with $K_r = 0.82$. According to the results of measurements and modeling of water resistance, it was concluded that it is possible to use mixtures based on AGC binders for plastering works on the facades of buildings made of limestone-shell rock.

The adhesion of the proposed plaster compositions to limestone-shell rock bearing surfaces was evaluated by the "ring tear" method. It was found that the adhesion of the experimental samples of the mixture to the supporting surfaces of shell rock, which were not previously treated with a primer, varies in a fairly large interval - from 0.1 to 0.57 MPa, that is, in the array of compositions there are already those whose adhesive strength exceeds the standard for plaster mixtures. The analysis of experimental data and modeling of the adhesion strength of the mixture showed that the maximum adhesion of the plaster mixture to limestone is ensured at the maximum cement and lime content of 50-60% of the gypsum amount in the

studied factor space and the minimum ash content of 20%. Under these conditions, the adhesive strength of the plaster composition exceeds 0.4 MPa.

An inverse relationship was established between the compressive strength of the hardened mixture and the adhesion strength of the mixture to the limestone surface; for the most part, samples with relatively high compressive strength have reduced adhesion and vice versa. According to the available data, no such dependence has been established for the flexural strength.

It is possible to increase the adhesion strength of the plaster mixture to the material of the main wall by using adhesive additives. The effect of the adhesive additive Ceresit CC 81 on the adhesion strength of the plaster mixture to the surface of shell rock and a more homogeneous surface of ceramic tiles was studied. The introduction of the additive to the plaster mixture in the amount of 3-10% increases the adhesive strength, compared to the additive-free mixture, by 1.3-2 times for any surface.

The coordination of the vapor permeability of limestone-shell rock and the proposed plaster mixture was checked. The vapor permeability coefficient of the shell rock samples taken from existing buildings varied from 0.067 to 0.081 $\text{mg/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$; the vapor permeability coefficient of the experimental samples of the GCC mixture ranges from 0.078 to 0.087 $\text{mg/m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}$, i.e., the materials under study are comparable and compatible in this characteristic. Checking the possibility of condensation inside the shell rock wall plastered with the composition proposed by the ZGCM using a special program proved that there is no such probability.

Taking into account the experimental data obtained and the results of mathematical modeling of the properties of the negative effect of lime on the strength and water resistance of the plaster composition, it was decided to exclude lime from the composition of the mixture in further studies. The basic composition of the ash and gypsum cement plaster mixture is based on the following combination of components (wt.%): gypsum - 50, cement - 30, ash - 20. The effect of reinforcement of the basic ash-cement plaster composition with basalt and polypropylene fibers on its strength, water resistance, and deformation properties

was studied. It was found that the introduction of reinforcing fibers increases the bending strength in the dry state by 1.2-1.4 times, and the compressive strength in the dry state by 1.35-1.5 times. The strength of the moistened fiber-reinforced specimens increased by 1.3 times compared to the unreinforced specimens. The softening coefficient of fiber-reinforced samples exceeds 0.8.

The influence of reinforcing fiber on the value of moisture deformations of plaster mixture samples in comparison with shell rock samples was determined.

The relative average deformation of the beams of the mixture without fiber in three wetting-drying cycles is 0.7%, i.e., exceeds the deformation of the shell rock samples by 0.45%. The relative deformation of the samples of the fiber-reinforced mixture (0.46%) coincides with the deformations of shell rock, so the reinforcement of the plaster mixture is a necessary operation. Almost the same effect of reducing the moisture deformation of the mixture was observed when both basalt and polypropylene fibers were introduced, which allows choosing the type of fiber according to other criteria, for example, for economic reasons.

The technological life of a plaster mixture based on gypsum is extended by using a common and relatively cheap retarder, citric acid. The effect of citric acid on the setting time of an ash-gypsum-cement mixture was investigated. The introduction of citric acid in the amount of 0.12% by weight of binders delays the onset of setting of the mixture to 26 minutes, which is sufficient from the point of view of the manufacturability of plastering works.

The experimental studies fully confirm the hypothesis that it is possible to use ash and gypsum cement binders in plaster mixtures for repair work on the facades of buildings made of limestone-shell rock.

According to the results of the dissertation, the proposed plaster composition was used to repair the wall of the entrance courtyard arch with an area of 32.5 m² of a 3-storey residential building made of limestone-shell rock located in the Primorsky district of Odesa.

Keywords: limestone-shell rock, repair, plaster composition, gypsum, cement, lime, ash, fiber, additives.