

Легкие штукатурные смеси на основе вулканического туфа-скория

Б. А. Демиссе¹, И.В. Бессонов², М.Б. Каддо¹, Н.З. Агафонова¹

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

² *Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН*

Аннотация: В состав легкой штукатурной смеси входят следующие компоненты: гидравлическое вяжущее, измельченный вулканический туф-скория (как мелкий легкий заполнитель), армирующее волокно и синтетическая добавка. Гидравлическое вяжущее состоит из портландцемента и тонкомолотого вулканического туфа. Штукатурные смеси на основе вулканического туфа востребованы в регионах с теплым или резко континентальным климатом: высокие температуры днем или низкие ночью, в том числе, и для Эфиопии.

Целью исследований, изложенных в статье, было: формирование моделей структуры материала, позволяющие оценивать свойства материала и оценка полученных решений в процессе реализации активного эксперимента. В результате эксперимента установлены оптимальные значения основных компонентов штукатурной смеси на основе вулканического туфа, который присутствует в составе смеси как легкий мелкий заполнитель и как компонент гидравлического вяжущего. Осуществлены моделирование структуры материала и инженерная интерпретация его свойств.

Ключевые слова: штукатурный материал, туф-скория, пуццолановая активность, математическое моделирование, аналитическая оптимизация.

Введение

Составы легких штукатурных смесей на основе вулканического туфа-скория имеют ряд отличий от классических смесей. Во-первых, туф скория присутствует в составе материала как легкий заполнитель (крупный песок диаметром до 5 мм) и в качестве компонента минерального модифицированного вяжущего [1-3]. Во-вторых, в состав растворной смеси вводятся армирующие волокна, повышающие структурную связность материала и удобоукладываемость смесей. В-третьих, армирование покрытия штукатурными сетками приближает материал к группе текстиль-бетонов с аддитивными нанесением на поверхности основания.

Легкие штукатурные смеси могут рассматриваться как вариант текстиль-бетонов. В материалах этой группы могут использоваться волокна различной природы: на основе рубленного базальтового или щелочестойкого

стеклянного волокна, каменной или стеклянной ваты, синтетические полимерные волокна, гибридные волокна, а также особо тонкие волокна, например углеродные [4-6].

В составе композитов могут использоваться без ущерба для свойств легкие наполнители. При научно-обоснованной дозировке введение таких наполнителей связано с улучшением эксплуатационных характеристик TRC и, в первую очередь снижением плотности, теплопроводности, а также снижения опасности возникновения трещин на ранних стадиях твердения. В качестве подобных наполнителей используются микросферы, измельченное пеностекло, вспученные породы вулканического происхождения и пр. [7-9].

Одним из перспективных направлений изучения свойств композитов является моделирование свойств продукта, основанное на изучении свойств структуры материала и компонентов, входящих в состав композита. Основой такого моделирования является последовательная формализация реальных структур, реализованное в методике, разработанной в НИУ МГСУ [10, 11]. Согласно этой методике, любую структуру зернистого материала можно представить в виде регулярной сетки, представленной на рисунке 1.

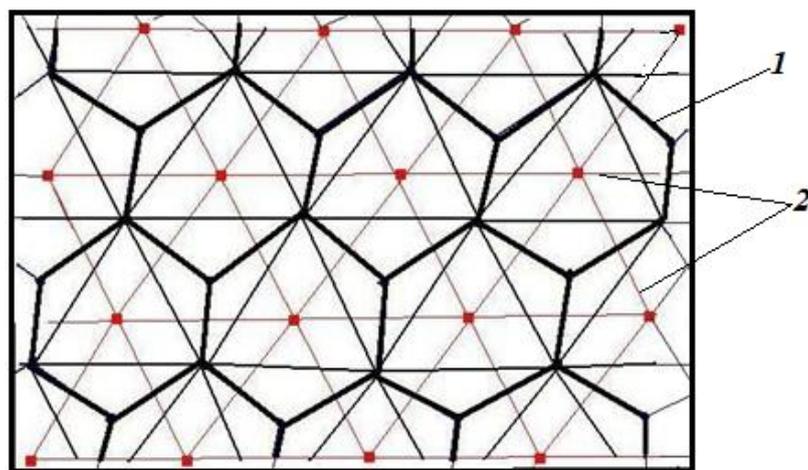


Рис. 1. Модельная структура зернистого материала

Характеристиками структуры объемного омоноличивания являются: диаметр частиц мелкого заполнителя, его распределение по размерам, толщины пленок вяжущего на поверхности частиц заполнителя (переходная зона), коэффициенты шероховатости поверхности заполнителя, его геометрия.

В качестве формализованной структурной единицы, как и штукатурной смеси, как твердеющего, так и затвердевшего материала, предложено рассматривать элементарный объем (рис. 2). Относительно «элементарно тетраэдра» исследуемый материал можно рассматривать как квазиоднородный, что делает возможным применение к изучаемым системам математических методов. Следовательно, оперируя понятием «элементарного тетраэдра» как составляющего элемента модельных структур можно дать оценку свойств проектируемых материалов.

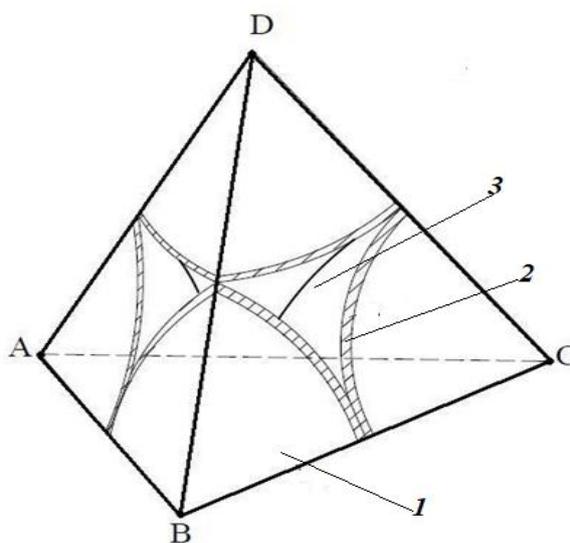


Рис. 2. Общий вид «элементарного объема»: 1 – частица легкого заполнителя; 2 – пленка вяжущего на поверхности частицы (контактная зона); 3 – модифицированный раствор; A, B, C, D – геометрические центры четырех контактирующих частиц заполнителя

В качестве характеристик материала, «собранного» из элементарных тетраэдров приняты: объем тетраэдра; содержание элементарных объемов в 1 м³ формовочной смеси $N=1/V$. Объем элементарно тетраэдра (V_T) рассчитываем в зависимости от радиусов средний радиус частицы мелкого заполнителя ($r_0 = 0,001$ м) и толщина пленки вяжущего (контактной или переходной зоны на поверхностях частиц заполнителя (δ , м);

$$V_T = \frac{2\sqrt{2}}{3} (r_0 + \delta_0)^3$$

$$\rho_m = \rho_{mv} \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta_0} \right)^3 \right] + \rho_{lz}$$

В формулах приняты следующие обозначения: ρ_{mv} – средняя плотность модифицированного вяжущего, кг/м³; ρ_{lz} – средняя плотность легкого заполнителя, кг/м³;

Целью исследований, изложенных в статье, было формирование моделей структуры материала, позволяющие оценивать свойства материала и оценка полученных решений в процессе реализации активного эксперимента.

Материалы, методы и результаты эксперимента

Состав штукатурной смеси входят следующие компоненты: гидравлическое вяжущее, измельченный вулканический туф (как мелкий легкий заполнитель), армирующее волокно и синтетическая добавка. Гидравлическое вяжущее состоит из портландцемента и тонкомолотого вулканического туфа.

В экспериментах использовался туф-скория (доставлен из карьера, города Адама, расположенного в 100 км от Аддис-Абебы) (рис. 3.). В легкой штукатурной смеси в качестве мелкого заполнителя использовалась смесь кварцевого песка и измельченного туфа-скория крупностью до 2 мм.

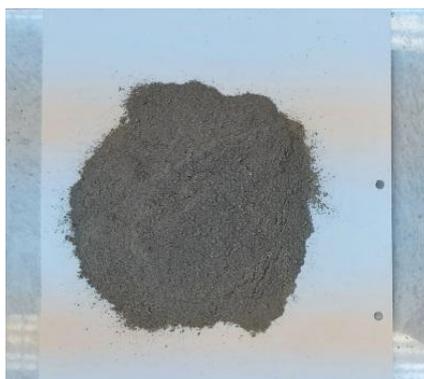


Рис. 3. Тонкомолотый вулканический туф-скория

Формирование свойств легкой штукатурной композиции основано на протекании физико-химических и химических процессов с возможностью их регулирования и внутреннего ухода за твердеющим гидравлическим вяжущим. Туф-скория используется как в качестве компонента композиционного вяжущего (в молотом виде), так и в составе легкой штукатурной смеси (в измельченном виде). Туф-скория как компонент обладающей пуццолановой активностью в процессах химического взаимодействия и гидратации клинкерных минералов связывает портландит с образованием гидросикатов группы С-S-H.

Молотый туф-скория за счет собственного водопоглощения (6–12%) и в присутствии эфира целлюлозы (синтетической добавки) на ранней стадии затвердения иммобилизует часть воды (до 20%), которую постепенно возвращает в гидратирующуюся систему компенсируя тем самым дефицит влаги в этой системе, что способствует снижению усадочных деформаций при твердении вяжущего и штукатурной смеси за счет создания оптимального водного баланса в твердеющей системе.

Легкая штукатурная смесь состоит из модифицированного композиционного гидравлического вяжущего (МКГВ), а в качестве армирующего компонента используется либо щелочестойкое стеклянное волокно, либо базальтовое волокно.

Таблица 1. Условия активного эксперимента

| Наименование фактора | Символ, X_i | Среднее значение фактора, \bar{X}_i | Интервал варьирования, ΔX_i | Значения фактора на уровнях | |
|---|------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----|
| | | | | -1 | +1 |
| Расход измельченного туфа, кг/м ³ | X_1 | 380 | 40 | 340 | 420 |
| Расход композиционного вяжущего (МКГВ), кг/м ³ | X_2 | 240 | 40 | 200 | 280 |
| Расход армирующего компонента, кг/м ³ | X_3 | 2,5 | 1,5 | 1 | 4 |

Результатирующие параметры: прочность при сжатии штукатурной смеси после 28 сут. твердения в нормальных условиях (Y_1), а также прочность при изгибе (Y_2). Средняя плотность определялась расчетным путем с учетом расходов компонентов смеси на 1 м³ и с учетом воды, пошедшей на гидратацию МКГВ и иммобилизованной вулканическим туфом.

В результате активного эксперимента и статистической обработки его результатов получены следующие математические модели (полиномы):

Для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 5,6 - 0,8X_1 + 1,8X_2 + 0,6X_3 + 0,4X_1X_2 + 0,3X_1^2 \quad (1)$$

Для прочности при изгибе:

$$Y_2 = 3,6 - 0,6X_1 + 0,7X_2 + 0,7X_3 + 0,4X_1X_2 - 0,4X_3^2 \quad (2)$$

Значимые коэффициенты, определяли, сравнивая модуль каждого коэффициента уравнения регрессии с доверительным интервалом Δb , рассчитанным из критериев Стьюдента (t -критерия) по параллельным опытам для прочности при сжатии и изгибе, соответственно $\Delta b_1 = 0,21$ МПа, $\Delta b_2 = 0,14$ МПа. Все коэффициенты, меньшие по своему абсолютному значению доверительных интервалов по прочностным характеристикам и по теплопроводности приняты незначимыми и обнулены (приравнены 0).

Полученные модели проверены на адекватности по критерию Фишера. Расчетные значения критериев Фишера равны для модели прочности при сжатии $F_1 = 16,4$; для модели прочности при изгибе $F_2 = 15,9$. Табличные же значения критериев Фишера, соответственно, равны 19,2; 19,3. Рассчитанные значения F-критерия не превышают табличного, и с соответствующей доверительной вероятностью (98%) модель можно считать адекватной.

Анализ алгебраических полиномов (1 и 2) показал, что функция трех переменных Y_2 имеет локальный оптимум по фактору X_3 (расход армирующего компонента). Используя метод локальной аналитической оптимизации мы можем найти оптимальное значение фактора X_3 сначала в кодированном, а потом и в натуральном виде (основываясь на данных табл.1):

$$\frac{\partial Y_2}{\partial X_3} = 0,7 - 0,8X_3 = 0 \rightarrow X_3 = \frac{0,7}{0,8} = 0,88$$

, или в натуральном виде:

Расход армирующего компонента (волокна) равен: $P_{a.k} = 2,5 + 0,88 \times 1,5 = 3,80 \dots 3,84\%$.

Подставляя кодированное оптимальное значение расхода волокна (фактор $X_3 = 0,88$) в уравнения (1, 2), получаем оптимизированные по этому параметру математические модели:

Для прочности при сжатии:

$$Y_1 = 6,1 - 0,8X_1 + 1,8X_2 + 0,4X_1X_2 + 0,3X_1^2 \quad (3)$$

Для прочности при изгибе:

$$Y_2 = 3,9 - 0,6X_1 + 0,7X_2 + 0,4X_1X_2 \quad (4)$$

Исследуемый материал, а именно легкое штукатурное покрытие на основе дисперсно-армированного модифицированного мелкозернистого бетона имеет структуру, включающую мелкий легкий заполнитель (туф-скория), модифицированное композиционное вяжущее и волокна,

армирующие структуры этого вяжущего свойства (рис. 4). Соотношение этих компонентов является основой для формирования свойств покрытия.

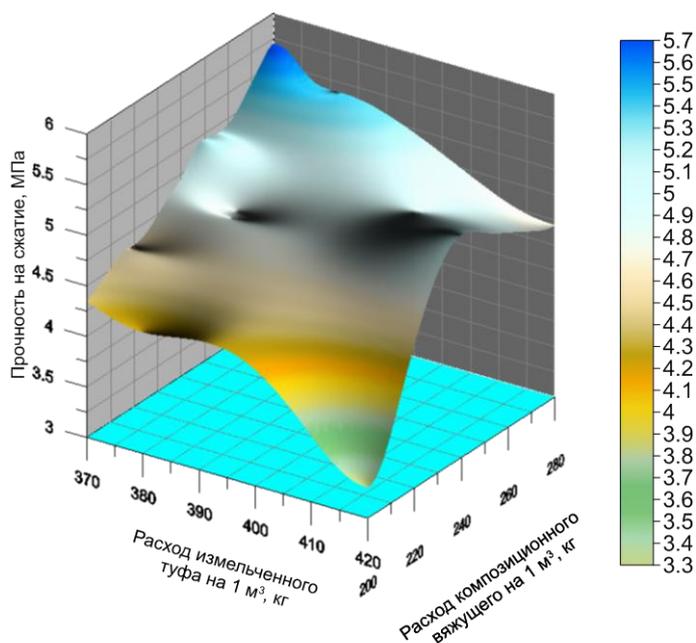


Рис. 4. Расчетная прочность на изгиб штукатурного материала с содержанием армирующего компонента 3,8 %.

Используя данные, полученные по результатам статистической обработки активного эксперимента и результаты установленных взаимосвязей между свойствами материала и его структурой осуществлена графическая интерпретация полученных зависимостей (рис. 4) и подобраны составы штукатурных смесей на основе вулканического туфа.

Результаты определения расчетных значений прочности штукатурного материала на сжатие и при изгибе в зависимости от расходов основных компонентов штукатурной смеси представлены в табл. 2.

После получения расчетных результатов был проведен корректирующий натурный эксперимент и получены значения прочности образцов составов. Расхождение между экспериментальными и расчётными данными не превышает 8-9%, что соответствует требованиям к уровню

достоверности результатов при изучении свойств материалов на основе гидравлических вяжущих и мелкозернистых бетонов.

Таблица 2. Свойства штукатурного материала

| № | Расход, кг/м ³ | | | Прочность при сжатии, МПа | |
|----|---------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|-------------|
| | Измельченного туфа | Композиционного вяжущего | Армирующего компонента | Расчётная | Эксперимент |
| 1 | 420 | 280 | 4 | 8,4 | 8,1 |
| 2 | 420 | 280 | 2,5 | 7,2 | 7,0 |
| 3 | 420 | 240 | 4 | 6,2 | 6,5 |
| 4 | 420 | 240 | 2,5 | 5,8 | 5,6 |
| 5 | 420 | 200 | 4 | 4,2 | 4,2 |
| 6 | 420 | 200 | 2,5 | 4,0 | 4,1 |
| 7 | 380 | 280 | 4 | 8,4 | 7,9 |
| 8 | 380 | 280 | 2,5 | 7,4 | 7,1 |
| 9 | 380 | 240 | 4 | 7,0 | 7,2 |
| 10 | 380 | 240 | 2,5 | 6,3 | 6,5 |

Выводы

Использование местного сырья как компонента строительных материалов экономически целесообразно, это касается и вулканических туфов, запасы которых находятся во все регионах, для которых была характерна или характерна сейчас вулканическая активность. Во-первых, вулканические туфы, в том числе, и туф-скория, обладают средней пуццолановой активностью, что делает возможным их использование в составе гидравлического вяжущего для замены части цементного клинкера. Во-вторых, это доступность месторождений и их распространенность во многих странах, что снижает логистические затраты. В-третьих, легкие штукатурки на основе туфа-скория могут использоваться при местном строительстве, в том числе, в регионах с резко континентальным климатом:

низкими температурами ночью и высокими — днем, обеспечивая комфортные условия в помещениях.

Разработанные составы штукатурных смесей на основе вулканического туфа-скория имеют ряд отличий от классических смесей.

В результате эксперимента установлены оптимальные значения основных компонентов штукатурной смеси на основе вулканического туфа, который присутствует в составе смеси как легких мелкий заполнитель и как компонент гидравлического вяжущего. Осуществлены моделирование структуры материала и инженерная интерпретация его свойств.

Литература

1. Zhukov, A.D., Bobrova, E.Yu., Bessonov, I.V., Medvedev, A.A., Demissi, B.A. Application of statistical methods for solving problems of construction materials science. *Nanotech. in Constr.* 2020. No. 12. Pp. 313-319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319.
2. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Жук П.М., Демисси Б.А., Говряков И.С., Минаева А.М. Вулканический туф как активная минеральная добавка для портландцемента // *Строительные материалы.* 2022. № 6. С. 25–29. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29.
3. Жуков А.Д., Попов И.И., Ефимов Б.А., Демиссе Б.А., Белканов В.В. Оптимизация составов фасадных штукатурок на основе модифицированного вяжущего // *Известия вузов. Строительство.* Новосибирск. 2022. №5. С. 57-66. DOI: 10.32683/0536-1952-761-5-57-66.
4. Каддо М.Б., Ефимов Б.А. Энергетическая эффективность фасадных систем изоляции // *Инженерный Вестник Дона,* 2024, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9582.
5. Curbach, M., Graf, W., Jesse, D., Sickert, J.U., Weiland, S. Segmentbrücke aus textil-bewehrtem Beton - Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. *Beton- und Stahlbetonbau.* 2007. 102(6). Pp. 342-352.

6. Schladitz, F., Lorenz, E., Jesse, F., Curbach, M. Verstärkung einer denkmalgeschätzten Tonnenschale mit Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau. 2009. 104(7). Pp. 432-437.

7. Gelbrich, S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textil-bewehrtem Beton und glasfaserverströktm Kunststoff. Leichter bauen — Zukunft formen. TUDALIT, 2012. No. 7. Pp. 9.

8. Cifuentes, H., Blasón, S., López-Aenlle, M., Martínez-De La Concha, A. Flexural fa-tigue behaviour of a heated ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Constr. and Build. Mat. 2021. No. 276. Pp. 8-16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122209

9. Ashkezari, G.D., Razmara, M. Thermal and mechanical evaluation of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete subjected to high temperatures. 2020. No. 32. Pp. 10-21. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117232

10. Daniel Zawal, Anna M. Grabiec. Influence of selected mineral additives on proper-ties of recycled aggregate concrete (RAC) considering eco-efficiency coefficients //Case Studies in Construction Materials. vol. 17. 2022.e01405 URL:doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01405

11. Стенечкина К.С. Применение декоративных бетонов для отделки зданий и сооружений // Инженерный Вестник Дона, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8272.

References

1. Zhukov, A.D., Bobrova, E.Yu., Bessonov, I.V., Medvedev, A.A., Demissi, B.A. Nanotech. in Constr. 2020. No. 12. Pp. 313-319. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319.

2. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Zhuk P.M., Demissi B.A., Govryakov I.S., Minaeva A.M. Stroitel`ny`e materialy`. 2022. № 6. pp. 25–29. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29.

3. Zhukov A.D., Popov I.I., Efimov B.A., Demisse B.A., Belkanov V.V. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. Novosibirsk. 2022. №5. pp. 57-66. DOI: 10.32683/0536-1952-761-5-57-66.

4. Kaddo M.B., Efimov B.A. Inzhenernyj Vestnik Dona, 2024, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9582.

5. Curbach, M., Graf, W., Jesse, D., Sickert, J.U., Weiland, S. Segmentbrücke aus textil-bewehrtem Beton - Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. Beton- und Stahlbetonbau. 2007. 102(6). Pp. 342-352.

6. Schladitz, F., Lorenz, E., Jesse, F., Curbach, M. Verstärkung einer denkmalgeschätzten Tonnenschale mit Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau. 2009. 104(7). Pp. 432-437.

7. Gelbrich, S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textil-bewehrtem Beton und glasfaserverströktm Kunststoff. Leichter bauen — Zukunft formen. TUDALIT, 2012. No. 7. Pp. 9.

8. Cifuentes, H., Blasón, S., López-Aenlle, M., Martínez-De La Concha, A. Flexural fatigue behaviour of a heated ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Constr. and Build. Mat. 2021. No. 276. Pp. 8-16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122209

9. Ashkezari, G.D., Razmara, M. Thermal and mechanical evaluation of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete subjected to high temperatures. 2020. No. 32. Pp. 10-21. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117232.

10. Daniel Zawal, Anna M. Grabiec. Influence of selected mineral additives on properties of recycled aggregate concrete (RAC) considering eco-efficiency coefficients. Case Studies in Construction Materials. vol. 17. 2022.e01405 URL: doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01405.

11. Stenechkina K.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8272.

Дата поступления: 28.10.2024

Дата публикации: 10.12.2024
