

ЭС-МОДЕЛИ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ГИПСОВЫХ ШТУКАТУРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Ляшенко Т.В., д.т.н., проф., с.н.с., Керш В.Я., к.т.н., проф.,
Колесников А.В.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Введение. Создание высокоэффективных теплоизоляционных материалов, в том числе, на гипсовых вяжущих и с полыми заполнителями, тем более, с использованием техногенного сырья, относится к приоритетным направлениям строительного материаловедения [1].

При разработке облегченных теплоизоляционных композиций на основе сульфата кальция изучались возможности введения разных легких заполнителей в гипсовую матрицу [2, 3]. Цель исследования, часть результатов которого представлена в данной статье – разработать составы для внутренних штукатурных покрытий, используя перлит в качестве основного наполнителя. Верхняя граница содержания теплоизолирующего компонента (вблизи разрушения материала) была оценена [4] на модельной системе с использованием электротепловой аналогии; оценка соответствует теоретическому значению перколяционного порога.

Для упрочнения композита часть перлита могла быть заменена ценосферами. Эти полые алюмо-силикатные микросферы золы уноса [5-6] известны как эффективный наполнитель [7-8], благодаря их форме, водонепроницаемости, низкой плотности и теплопроводности.

Предварительные эксперименты показали, что введение определенных дозировок метакаолина, пластификатора, и латекса могут улучшить гипсовую матрицу, структуру и свойства композита.

Условия эксперимента и ЭС-модели. Варьируемые в эксперименте четыре рецептурных фактора X_i ($i=1\dots4$), нормализуемые к $-1 \leq x_i \leq +1$, представлены в табл. 1. Гранулометрию легких наполнителей характеризуют следующие статистики распределений размера зерен (мк). *Перлит* – в диапазоне 1.0-124.3, при среднем 6.6, медиане 3.5; *микросферы* – в диапазоне 1.0-197.8, при среднем 22.7, медиане 11.4; моды обоих распределений вблизи нижних границ диапазонов.

Свойства (Y) сухих и технологических смесей и затвердевшего материала были определены для 18 композиций (в указанных диапазонах

содержания компонентов), соответствующих трехуровневому оптимальному плану эксперимента второго порядка (план 57 в [9]), который позволяет построить четырехфакторные экспериментально-статистические (ЭС) модели вида (1).

$$Y(x) = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_i b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Таблица 1. Значения варьируемых дозировок компонентов

<i>i</i>	Фактор X_i	Уровни		
		$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
1	Количество перлитового песка (<i>P</i> , объемные части на 1ч. гипса)	10	15	20
2	Количество ценосфер (<i>CS</i>) и метакаолина (<i>MK</i>) в их смеси (5% от объема гипса)	5% <i>CS</i>	по 2.5% <i>CS</i> и <i>MK</i>	5% <i>MK</i>
3	Дозировка суперпластификатора (<i>SP</i>) (% от объема гипса):	0.5	0.75	1.0
4	Содержание латекса (<i>L</i>) (% к объему жидкой смеси)	1	1.5	2

В таблице 2 приведены коэффициенты ЭС-моделей, построенных для рассматриваемых в статье свойств. Это плотность ρ (кг/м³), прочности при сжатии и изгибе R_c и R_b (МПа), теплопроводность λ (Вт/м/К), адгезионная прочность R_A (МПа), коэффициент звукопередачи (звукопроницаемости) τ , представляющий собой [10] отношение энергии прошедшего через преграду звука к энергии падающих звуковых волн; нулевые значения коэффициентов моделей соответствуют статистически не значимым эффектам факторов.

Рецептурные поля свойств. Модели описывают поля свойств в координатах четырех рецептурных факторов. Основные обобщающие показатели (*G*) этих рецептурных полей представлены в табл. 3.

Анализ свернутой в ЭС-моделях информации о роли компонентов в формировании структуры и свойств композита выходит за рамки данной статьи. Ниже представлены получаемые по моделям рецептурные решения. Как и следовало ожидать, составы, обеспечивающие лучшие уровни отдельных свойств, находятся в разных рецептурных зонах (см. табл. 3). Однако весьма значительные перепады (в разы) уровней большинства свойств в границах всей рецептурной области указывают на возможность обеспечить, за счет разных дозиро-

вок, разные требования к материалу и на возможность компромиссов.

Таблица 2. Коэффициенты ЭС-моделей для 6 свойств теплоизоляционных гипсовых штукатурных композиций

	ρ	R_c	R_b	λ	$\ln R_A$	τ
b_0	538.9	1.13	0.55	0.109	-1.322	0.416
b_1	-51.4	-0.61	-0.26	-0.016	-0.531	-0.027
b_2	5.4	0.06	0	0	-0.226	-0.007
b_3	16.0	0.06	-0.04	0	-0.208	-0.031
b_4	-7.7	0.05	0.05	-0.003	0.162	-0.021
b_{11}	30.7	0.38	0.07	0.012	0	0
b_{22}	0.0	0.30	0.08	0	0.348	0.028
b_{33}	-19.7	-0.17	-0.04	0	0	0
b_{44}	0.0	0	0.05	-0.007	0	0
b_{12}	0.0	0	0	0	-0.220	-0.028
b_{13}	-14.0	0	-0.04	0	0	-0.053
b_{14}	11.0	0	0.04	0.003	-0.093	-0.042
b_{23}	0.0	0.08	0	0	-0.086	-0.02
b_{24}	-9.6	-0.07	0	-0.006	0	-0.02
b_{34}	-7.5	-0.09	-0.03	-0.005	0.113	-0.043

Таблица 3. Обобщающие показатели рецептурных полей 6 свойств

G	Y	ρ	R_c	R_b	λ	R_A	τ
Y_{\min}		469.3	0.51	0.24	0.086	0.09	0.15
Y_{\max}		672.5	2.56	1.03	0.147	0.99	0.54
$\Delta = Y_{\max} - Y_{\min}$		203.2	2.05	0.79	0.061	0.90	0.39
$\delta = Y_{\max} / Y_{\min}$		1.4	5.0	4.3	1.7	11.4	3.5
x_{\min}	x_1, x_2	0.8, -1	0.8, -0.1	+1, 0	0.5, +1	+1, 0.7	+1, +1
	x_3, x_4	-1, -1	-1, -1	+1, -0.5	+1, +1	+1, -1	+1, +1
x_{\max}	x_1, x_2	-1, +1	-1, +1	-1, +1	-1, +1	-1, +1	-1, +1
	x_3, x_4	+1, -1	0.7, -1	-0.4, +1	+1, -1	-1, +1	+1, -1

Допустимые и оптимальные составы. Модели позволяют «просканировать» рецептурные поля и таким образом определить допусти-

мые дозировки компонентов, при которых выполняются те или иные требования к штукатурным композициям. В частности, для теплоизоляционных штукатурок согласно ДСТУ Б В.2.7-126:2011 требуется обеспечить $R_c \geq 1$ МПа, $R_b \geq 0.5$ МПа, $\lambda \leq 0.2$ Вт/м/К, $R_A \geq 0.2$ МПа. Область составов, удовлетворяющих этим нормативным требованиям, составляет около 62% от всей исследованной четырехмерной области дозровок (по показателю Ω – размеру допустимой области [11-12]).

Представлялось целесообразным найти такие из допустимых составов, которые обеспечивали бы как можно более низкую плотность и звукопроницаемость. Для поиска компромисса между минимумами ρ и τ при указанных выше ограничениях на другие свойства использовалось итерационное случайное сканирование рецептурных полей [12-14]. Получен следующий компромиссно оптимальный состав со следующими свойствами:

$$P = 16.5 (x_1 = 0.3); CS = 0, MK = 5\% (x_2 = +1);$$

$$SP = 1\% (x_3 = +1); L = 2\% (x_4 = +1);$$

$$\rho = 502 \text{ кг/м}^3, R_c = 1.2 \text{ МПа}, R_b = 0.54 \text{ МПа},$$

$$\lambda = 0.09 \text{ Вт/м/К}, R_A = 0.21 \text{ МПа}, \tau = 0.26.$$

Как видно в табл. 3, теплопроводность разрабатываемых облегченных композиций во всей исследуемой рецептурной области ниже требуемой для обычных теплоизоляционных штукатурных растворов. Важно, что может быть существенно увеличена адгезия. Очевидно, данный набор компонентов позволяет получить высокоэффективные штукатурные композиции, в том числе, специального назначения. Поэтому была решена и следующая задача оптимизации:

$$\rho \rightarrow \min, \lambda \rightarrow \min, R_A \rightarrow \max, \tau \rightarrow \min, \text{ при } R_c \geq 1, R_b \geq 0.5 \text{ МПа.}$$

Найденный компромиссный состав: $P = 16$ ($x_1 = 0.2$); $CS = 5$, $MK = 0\%$ ($x_2 = -1$); $SP = 1\%$ ($x_3 = +1$); $L = 2\%$ ($x_4 = +1$); $\rho = 516.1 \text{ кг/м}^3$, $R_c = 1.1$, $R_b = 0.57 \text{ МПа}$, $\lambda = 0.1 \text{ Вт/м/К}$, $R_A = 0.44 \text{ МПа}$, $\tau = 0.38$.

Заключение. Разработаны облегченные тепло- и звукоизоляционные гипсовые штукатурные композиции, наполненные перлитовым песком, с добавлением микросфер золы уноса, метакАОлина, пластификатора и латекса.

Summary

The lightened heat insulating and soundproofing gypsum based compositions for indoor plaster coverings are presented, developed with the help of experimental-statistical models. The compositions contain perlite sand, fly ash microspheres, metakaolin, superplasticiser, and latex in optimal proportions.

Литература

1. Соломатов В.И. Строительное материаловедение на рубеже веков: ретроспектива двадцатого века, прогноз приоритетных исследований // Современные проблемы строительного материаловедения. Материалы пятых академических чтений РААСН. – Воронеж, 1999. – С. 5-12.
2. Lyashenko T., Kersh V., Kersh D. Modelling the effect of composition on the properties of gypsum concrete containing cenospheres // Proc. 18 Ibausil. – Weimar (Germany), 2012. – V. 1. – P. 1-0416-0423.
3. Керш В.Я., Фоц А.В. Гипсобетон с полистирольным наполнителем // Вісник ОДАБА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2010. – Вип. №39, ч. 1. – С. 319-323.
4. Керш В.Я., Колесников А.В., Фоц А.В. Оптимизация структуры и свойств теплоизоляционных композитов на основе их дискретных моделей // Вісник ОДАБА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2013. – Вип. №51. – С. 256-260.
5. Wandell T. Cenospheres: From Wastes to Profits. – The American Ceramic Society Bulletin, 75, No 6, 1996. – P. 79-81.
6. Drozhin V., Pikulin V., Kuvaev M., Redyushev S., Shprit M. Technical monitoring of microspheres from fly ashes of electric power stations in the Russian Federation // World of Cold Ash, Lexington (USA), 2005. www.flyash.info
7. Лапко К.Н. Неорганические полые микросферы – эффективные наполнители для строительных материалов // Современные технологии сухих смесей в строительстве. – СПб., 2006. – С. 106-110
8. Tiwari V., Shukla A., Bose A. Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete. – Applied Acoustics, 65, 2004. – P. 263-275.
9. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей. Спр. изд. / под ред. Налимова В.В. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
10. Ковригин С.Д. Архитектурно-строительная акустика: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш.школа, 1980 – 184 с.
11. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. – ОГАСА, НИИВМ им. В.Д. Глуховского. – К., 1996. – 105 с. www.frabul16.wix.com/dvoe/publications
12. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.
13. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (максимизация прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурса). – Современное промышленное и гражданское строительство, Т. 3, №1, 2007. – С. 5-15.
14. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Gavriulik V.P. Multicriterion optimisation of autoclaved aerated concrete properties and expenditure of energy resources // Brittle Matrix Composites 9. Cambridge: Woodhead Publ. Ltd., Warsaw: IFTR, 2009. P. 219-226.