

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
В МАТЕРИАЛАХ И СМЕСЯХ  
ОБЪЕМОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**Колесников А.В., Керш В.Я., Керш Д.В., Ляшенко Т.В.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Одной из наиболее актуальных проблем в современном строительстве является поиск и внедрение энергосберегающих мероприятий и инженерных решений, связанных, в частности, с производством ограждающих конструкций зданий и сооружений с минимальными тепловыми потерями. Важную роль в решении этих задач играют методы получения новых строительных материалов и изделий с улучшенными теплоизоляционными характеристиками.

Свойства теплоизоляционных композитов формируются на основе свойств исходных компонентов, которые можно приближенно разделить на химические, связанные со структурой и составом их молекул, а также с их взаимным влиянием в материале, и физические, связанные, прежде всего, с гранулометрическим составом, формой и характером поверхности частиц твердых компонентов. Таким образом, структура материала на протяжении всех этапов его изготовления и дальнейшей эксплуатации является основой для формирования основных видов свойств.

Теплоизоляционные материалы для ограждающих конструкций, в общем случае, представляют собой композицию, состоящую из связующего, как правило, с достаточно высокой теплопроводностью, и легких заполнителей с низкой теплопроводностью. В качестве вяжущих материалов могут применяться полимерные смолы и эмульсии, а также гипс и цемент. В качестве теплоизоляционных заполнителей наиболее часто применяют перлит, вермикулит, шлаковую пемзу, пробку, гранулы вспененного полистирола и др. Особым случаем теплоизоляционного заполнителя является воздух, например воздушные поры в ячеистом бетоне или вспененных пенопластах. В последнее время получает распространение относительно новый вид теплоизоляционного заполнителя – микросферы различного происхождения, в том числе, зольные.

Известно, что теплопроводность теплоизоляционных материалов связана обратной зависимостью с их плотностью (или прямой с пори-

стостью), то есть для получения материала с низкой теплопроводностью содержание легкого заполнителя (наполнителя) должно быть максимальным.

Основные методы структурной оптимизации поясняются на рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности неоднородна и может быть качественно отображена в следующей форме. Имеется магистральная линия (2) зависимости, находящаяся внутри коридора 1, ограничивающего часть плоскости  $\rho\lambda$ . Варьируя структуру материала, можно решать оптимизационную задачу 3 – искать наименее плотный материал с заданной теплопроводностью  $\lambda$  либо задачу 4 – минимизировать теплопроводность при известной плотности  $\rho$ .

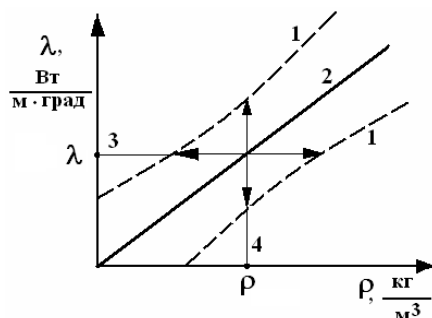


Рис. 1 Основные задачи структурной оптимизации теплоизолирующего композита: 1 – границы возможностей структурной оптимизации; 2 – магистральная зависимость коэффициента теплопроводности от плотности материала; 3, 4 – отображение двух соответствующих задач структурной оптимизации

Как показали исследования [1], материал становится эффективным теплоизолятором при содержании легкого заполнителя примерно 85% от объема смеси. Однако по мере роста содержания теплоизолирующего компонента прочность композиции начинает снижаться. При некотором объемном содержании легкого заполнителя, близком к указанному, из-за нехватки связующего, материал теряет сплошность и начинает разрушаться.

Обычно составы теплоизоляционных композиций подбирают эмпирическим путем. Как правило, высоконаполненные материалы, являясь хорошими теплоизоляторами, имеют низкую прочность и не могут использоваться как конструктивно-теплоизоляционные. И наоборот, материалы с достаточно высокой прочностью, не обладают способностью эффективной теплоизоляции. В то же время установлено, что введение некоторых легких заполнителей, в определенных пределах, существенно повышает прочность композиции.

В эксперименте по замене части вяжущего микросферами размером от 10 до 200 мкм объемный расход микросфер изменялся от 0 (контрольный образец) до 90% от объема гипса. Результаты испытаний

опытных образцов гипсобетона с микросферным наполнителем (сферо-гипсобетона) приведены на рис. 2. Например, при введении в гипсовое вяжущее микросфер в количестве 5 объемных процентов, прочность затвердевшего материала повышается в 1,5 раза [2]. Аналогичный эффект наблюдался при использовании в качестве вяжущего цемента [3].

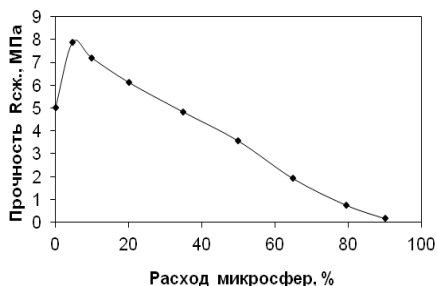


Рис. 2. Влияние микросфер на прочность сферогипсобетона

Причина этого эффекта предполагает суммирующееся действие нескольких механизмов, один из которых находит подтверждение в настоящей работе.

Распределение по размерам микросфер таково, что большая часть из них занимает внутренние пустоты материала. Избыточное количество таких частиц, особенно крупных, влияют, прежде всего, геометрически, препятствуя образованию агрегатов частиц вяжущего. При этом процессы гидратации происходят в более полной мере. Кроме этого, добавленные микросферы своими поверхностными и объемными свойствами благоприятствуют релаксации внутренних напряжений образующейся кристаллической структуры. Важными также являются физико-химические механизмы, связанные с кальций-натриевым обменом между поверхностью микросфер и вяжущим, и образованием силикатных структур с участием этих поверхностей [4, 5].

Влияние микросфер на прочностные свойства гипсобетона принципиально отличается от влияния других легких заполнителей, в частности, перлита и вермикулита, стабильно снижающих прочность при любых дозировках.

Предполагается, что, используя этот эффект, можно значительно повысить содержание в смеси других легких теплоизолирующих компонентов, например – перлита, тем самым улучшить теплозащитные свойства композиции при сохранении заданного уровня прочности.

В данной работе поставлена задача исследовать на сухих смесях эффект уплотнения смесей порошкообразных компонентов материала с точки зрения компактности упаковки частиц вяжущего и заполнителя.

Исследованы реальные смеси, в которых в качестве вяжущего компонента использованы полуводный гипс Г5 и цемент, а как теплоизоляционные компоненты – микросферы, перлитовый песок, перлитовый порошок и известняковая мука. Экспериментально проверена гипотеза об уплотнении смесей, состоящих из частиц различных размеров при их определенных количественных объемных соотношениях, другими словами – о неаддитивности смешиваемых объемов.

С этой целью производилось попарное смешивание порошкообразных материалов в различных объемных соотношениях; после тщательного перемешивания смеси и фиксированной процедуры уплотнения методом встряхивания измерялся объем смеси. В результате таких измерений для каждой пары рассматриваемых материалов были получены данные, рассмотренные на рис. 3. Каждый из приведенных графиков имеет как общие, так и особенные черты, обусловленные физическими свойствами компонентов.

Причины отклонения от аддитивного закона могут быть классифицированы следующим образом:

1. Геометрические свойства частиц различных компонентов материала. Простейшим примером здесь будет заполнение полостей и пустот между частицами одного материала частицами другого. Это – наиболее существенная причина неаддитивного поведения.

2. Причины структурного характера. Многие частицы материалов представляют собой рыхлые агрегаты, способные к разрушению и дальнейшему измельчению в процессе исследования материала.

3. Физико-химическое взаимодействие между частицами. Это взаимодействие может быть обусловлено электризацией частиц зарядами разного знака при условиях трения, зарядами на поверхности частиц, возникающими за счет деформации (пьезоэффект), взаимодействием заряд-диполь и диполь-диполь и, наконец, дисперсионными силами. Взаимодействия всех этих типов при размере частиц 100 микрон и меньше приводят к сильному отклонению от законов плотной упаковки [4], особенно при малых уплотняющих воздействиях.

В целом, причины неаддитивного поведения многообразны и трудно разделимы. Их совместное либо индивидуальное действие часто приводит к образованию упорядоченных структур кластерного типа [6], что можно рассматривать как проявление способности к самоорганизации. Для всех зависимостей на рис. 3 характерно выраженное в разной степени отклонение от аддитивного закона при малой доле (до 10%) добавляемых частиц дисперсной фазы.

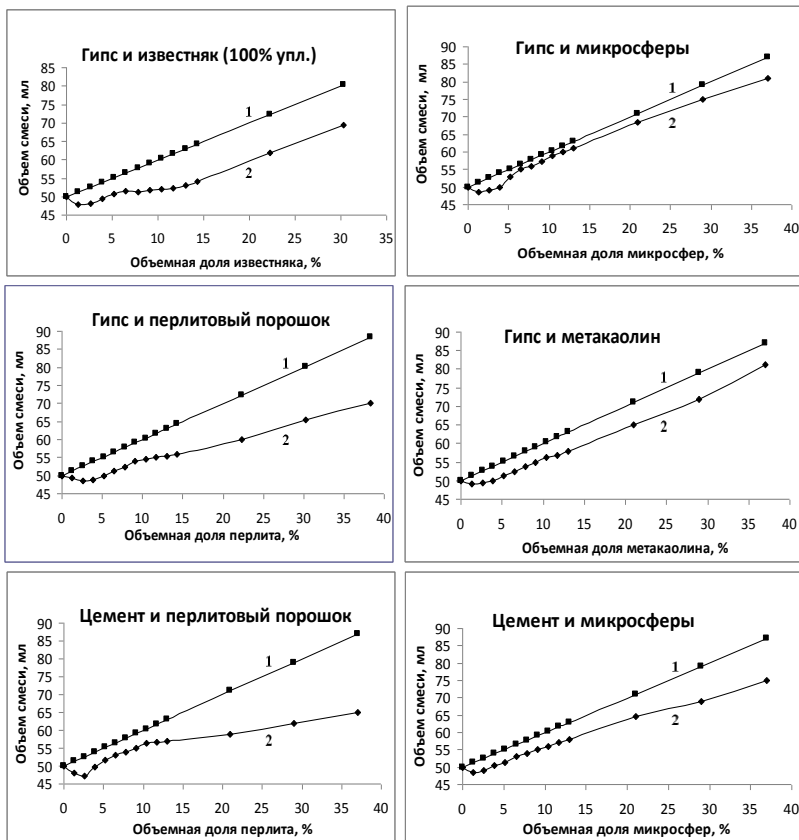


Рис. 3. Отклонение объема смеси от суммы объемов исходных компонентов: 1 – сумма объемов исходных компонентов смеси, 2 – объем смеси соответствующих компонентов

Здесь в качестве основных причин следует указать геометрические и физико-химические. Происходит заполнение пустотной структуры порошка. Одновременно с геометрическими на первом участке зависимостей (рис. 3) действуют и физико-химические факторы, связанные с адгезией частиц.

Следующие участки графиков имеют переходный характер, здесь наряду с заполнением пустот происходит раздвижка и отдаление друг от друга частиц с большей объемной долей. Соответствующие соотношения количества частиц интересны с точки зрения оптимизации

структуры материала и процессов твердения. Характерно, что возрастание прочности материала, наблюдаемое в эксперименте и показанное на рис. 2, возникает при доле заполнителя, характерной для переходного участка.

Последующие участки графиков близки к линейным, многие из них параллельны графику суммарного объема. Здесь происходит заполнение объема добавляемым материалом, а также измельчение и уплотнение рыхлых частиц (перлит), нельзя исключить и действие физико-химических факторов.

В качестве рабочей гипотезы рассматривается предположение о доминирующей роли геометрических факторов. С этой целью с помощью компьютерной микроскопии и методов статистической обработки рассматривались препараты соответствующих компонентов. Получен следующий набор данных для каждого материала (табл. 1.).

Таблица 1

Статистические показатели	1	2	3	4	5
	Известняк	Гипс	Микро сферы	Перлит	Мета каолин
Число частиц	1012	4133	665	4048	510
Средний размер, мм	0,01773	0,01203	0,02269	0,00660	0,00401
Стандартное отклонение, мм	0,01514	0,01112	0,02869	0,00952	0,00805
Минимум, мм	0,00068	0,00068	0,00068	0,00068	0,00074
Максимум, мм	0,09526	0,10555	0,19785	0,12429	0,06944

Приведенные выше результаты позволяют разделить частицы материалов на три категории: наполнители с относительно крупными зернами (микросферы и известняк), вяжущее со средним размером зерен (гипс) и мелкодисперсные наполнители (перлит, метакаолин).

Распределение по размерам для гипса – мономодальное, достаточно острое с несколько уплощенным максимумом. Таким образом, гипс Г5 рассматриваемой здесь партии можно огрубленно считать монодисперсным вяжущим материалом. Большая часть микросфер имеет малые размеры, однако распределение характеризуется достаточно большим остатком – «хвостом», свидетельствующим о наличии крупных индивидуальных частиц, количество которых, однако, мало.

Распределение частиц молотого известняка по размерам приближенно мономодально, распределение характеризуется значительным разбросом по дисперсности (полидисперсный материал). Частицы известняка достаточно крупные. Роли мелких и крупных частиц в фор-

мировании свойств материала с наполнителем – известняком могут различаться.

Характер распределения частиц перлита по размерам - такого же типа, как и у гипса. Для него следует учитывать возможность формирования агрегатов частиц сложной фрактальной геометрии.

Метакаолин, судя по статистическим данным, можно считать монодисперсным материалом с наиболее мелкими частицами. В композитах он будет заполнять мельчайшие поры, т.е. это – своеобразный аналог сплошной среды. Благодаря своей физико-химической активности и способности взаимодействовать с водой, он будет положительно влиять на прочность композита. Из всех рассмотренных материалов активность метакаолина может быть связана со структурой частиц и формой их распределения наиболее очевидным образом.

Реализация геометрического механизма субаддитивности наиболее вероятна в парах материалов: 1-2, 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, 3-2, 3-4, 3-5, (первым, согласно нумерации табл. 1, указывается материал в наибольшей концентрации).

### ***Выводы***

В целом, методика предварительного исследования компонентов композита на отклонение от закона аддитивности позволяет выявить закономерности образования групп частиц, обусловленные совместным или раздельным действием факторов различной природы. Получаемая при таком исследовании информация оказывается полезной при проектировании композиционного материала теплоизоляционного назначения.

### **Summary**

**The preconditions of structural optimization of thermo isolative materials have considered. The studies of the bulk material characteristics of the components and their mixtures have done. The impact of compactness in packing of particles on the strength characteristics of composites have analyzed.**

## *Литература*

1. Керш В. Я. Исследование тепловой проводимости модельных композиций методом электротепловой аналогии / Керш В. Я., Колесников А. В. // Сб. наук. праць КНУБА. - Киев, 2012, вип.46, с. 269-275.0
2. Керш Д.В. Облегченный гипсобетон для реконструктивных задач в городском строительстве / Керш Д.В., Фощ А.В., Марчук О.Н. // Мат.- ли МНПК «Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві», ОДАБА, 2011, с. 56-78.
3. Керш В.Я. / Влияние компонентов смеси на свойства полистиролбетона/ Керш В.Я., Холдаева М.И./Вісник ОДАБА вип. № 31, Одесса, 2008, с. 163-170.
4. В.В. Белов. Оптимизация гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов/В.В. Белов, М.А. Смирнов, А.Н. Лебедев// Вестник МГСУ, спецвыпуск 3, 2009, с. 125-128.
5. Орешкин Д.В. Регулирование прочности цементных систем с полыми стеклянными микросферами в процессе твердения на наноровне/ Орешкин Д.В., Беляев К.В., Семенов В.С.//Вестник МГСУ, спецвыпуск 3, 2009, с. 171-178.
6. Выровой В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции / Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Суханов В. Г. Одесса, 2011, 168 с.