

## МЕТОДЫ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина*

*В статье рассматриваются структурные и геометрические аспекты оптимизации теплоизоляционных материалов. В качестве модельного структурного элемента материала рассматривается ячейка из теплоизолирующих частиц, в промежутках между которыми находятся частицы вяжущего. Структура из таких ячеек устойчива к разрушению и характеризуется низкой теплопроводностью. Между размерами частиц вяжущего и теплоизолирующего заполнителя в рассматриваемых структурах должны выполняться соотношения, согласующиеся с кристаллографическими правилами Магнуса - Гольдшмидта. На основании результатов гранулометрических измерений оказывается возможным подобрать структурно-согласованные и несогласованные пары заполнитель-заполнитель и заполнитель - вяжущее и тем самым осуществить один из методов структурно-геометрической оптимизации материала.*

**Постановка проблемы.** Актуальной задачей строительной отрасли является разработка и внедрение энергоэффективных строительных материалов и изделий с улучшенными теплоизоляционными характеристиками.

Свойства теплоизоляционных композитов формируются исходными компонентами. Свойства последних, в свою очередь, упрощенно можно разделить на химические, связанные со структурой и составом их молекул, и структурные, связанные с гранулометрическим составом, формой и характером поверхности частиц твердых компонентов.

**Основная часть.** В настоящей работе рассматриваются пути оптимизации материала за счет изменения геометрических характеристик частиц компонентов и характера их взаимосвязи в материале. Оптимизация свойств этого вида далее называется структурной. Она может быть осуществлена несколькими методами, наиболее перспективным из которых с экономической и технологической точки зрения является формирование оптимального гранулометрического состава компонентов.

Рассмотрим модель теплоизоляционного материала в виде упаковки однородных по размеру частиц, близкой к плотнейшей. Такое упрощение носит модельный характер и оправдано для сравнительно крупных частиц теплоизоляционного заполнителя, характеризующихся мономодальным распределением и формой, близкой к сферической. Промежутки между частицами заполнителя (полости) заполнены теплопроводящим вяжущим материалом.

Для уменьшения теплопроводности необходимо «прервать» часть теплопроводящих путей рассматриваемого вида и внести в рассматриваемую упаковку сферические частицы теплоизолятора, вмещающиеся в промежуточные полости.

Следует отметить, что большая часть доступных теплоизолирующих заполнителей с широким гранулометрическим распределением (полидисперсный материал) в связи с рассматриваемым критерием являются «самозаполняющимися». Таковы, например, распределения частиц по размерам для микросфер и известняка, полученные с помощью методов обработки микроскопических изображений (рис. 1).

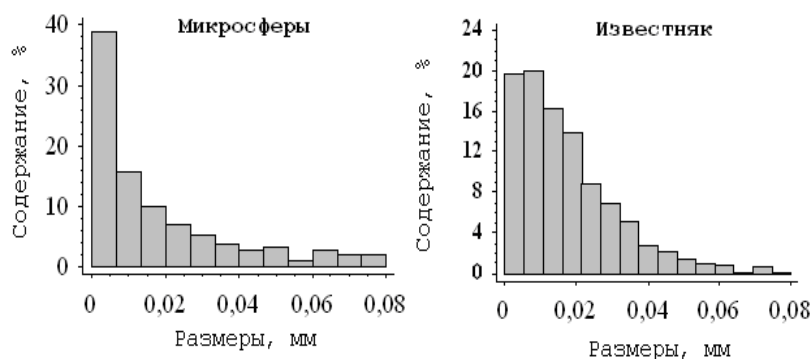


Рис.1. Гранулометрические характеристики полидисперсных материалов

При добавлении материала с меньшим размером частиц будет наблюдаться эффект заполнения свободного объема. Это хорошо видно в результатах исследования неаддитивности объемов таких порошкообразных материалов, как гипс и метакралин (рис. 2).

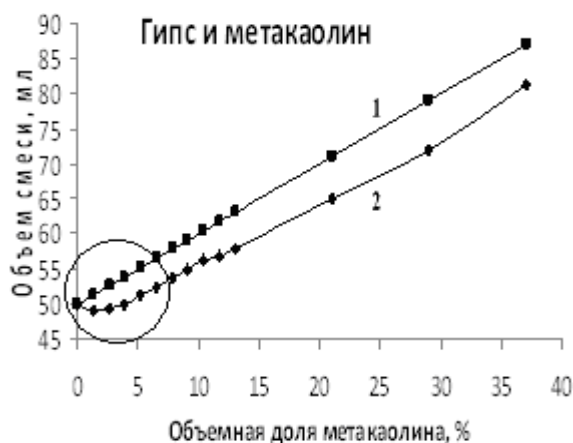


Рис. 2. Результаты исследования неаддитивности объемов смесей материалов (в круге – отображение эффекта заполнения объема)

Другой подход к оптимизации гранулометрического состава композита тесно связан с кристаллографией и основан на правилах Магнуса-Гольдшмидта и на теории координационных полиэдров Полинга [2]. В науках о кристаллах они указывали устойчивые формы координации в ионных кристаллах в зависимости от соотношения радиусов катионов и анионов. Основная часть

соответствующих правил носит чисто геометрический характер, она может быть перенесена на более крупные частицы теплоизолирующих заполнителей и вяжущего. Они также относятся к сферическим моделям частиц. В таблице 1 приведены типы основных координационных полиэдров и соответствующие им отношения радиусов частиц. В первом столбце рассматривается случай, когда частицы А–меньшие, вокруг них и происходит координация частиц В, во втором частицы А – большие, они координируются вокруг В.

Таблица 1

Типы основных координационных полиэдров и соответствующие им отношения радиусов частиц

R(A)/R(B)	R(A)/R(B)	Координационное число	Форма окружения
0-0,15	6,45-∞	2	Гантель
0,15-0,22	4,45-6,45	3	Треугольник
0,22-0,41	2,41-4,45	4	Тетраэдр
0,41-0,73	1,37-2,41	6	Октаэдр
0,73-1,00	1-1,37	8	Куб
1	1	12	Кубооктаэдр (12 вершин)

На рис. 3. изображены формы полиэдров и схемы координации с соответствующими координационными числами

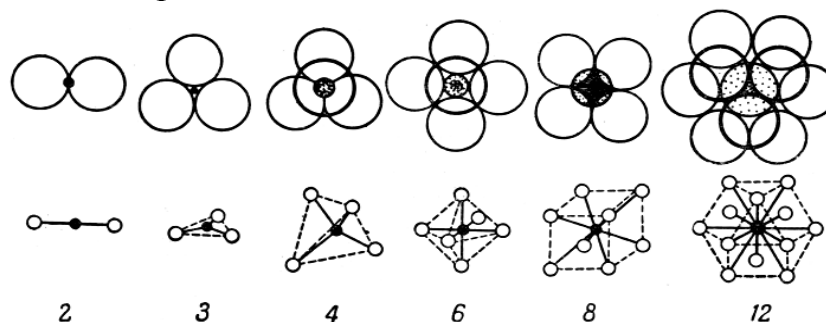


Рис.3. Схемы формирования координационных полиэдров

Оптимизация структуры материала путем подбора гранулометрического распределения компонентов с применением рассмотренных принципов может быть проведена следующим образом. Необходимо стабилизировать полиэдры, образованные частицами вяжущего как центрами координации [4], и дестабилизировать полиэдры, образованные только частицами заполнителей со слабой способностью к взаимной адгезии (так как последние снижают прочность материала).

Таким образом, большая доля частиц вяжущего и наполнителя должна удовлетворять гармоническим соотношениям таблицы 1. Если материалы не уплотнены, часто образуется локально-тетраэдрическая упаковка, образованная несколькими деформированными тетраэдрами [3]. Если в этом случае радиус большинства частиц заполнителя будет  $r$ , то радиус большинства частиц вяжущего должен принадлежать интервалу  $0,22 r - 0,41 r$ , причем оптимальная структура образуется при  $\approx 0,3 r$ .

Рассмотрим пример – вяжущий материал гипс Г-5 и добавку, положительно влияющую на прочностные характеристики – метакраолин. Из распределений, полученных с помощью компьютерной микроскопии (рис. 4), видно, что частицы гипса в целом крупнее. Средний размер частиц гипса – 0,012 мм, метакраолина – 0,004 мм. Исходя из рассмотренных данных и табл.1, можно сделать вывод о согласовании распределений, при этом в смеси этих двух материалов частицы гипса будут группироваться вокруг частиц метакраолина с наиболее вероятным образованием тетраэдра.

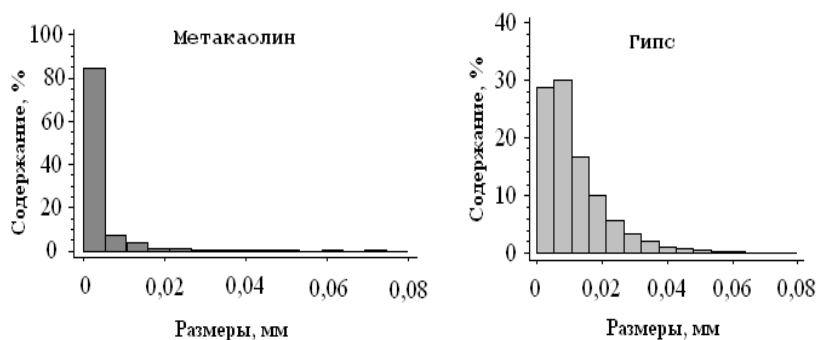


Рис. 4. Распределение частиц материалов, согласованных по гранулометрии

В то же время смесь гипса и известняка (рис. 4 и рис. 2) будет характеризоваться отсутствием структурной селективности – характер распределения частиц здесь во многом подобный.

Путь дестабилизации полиэдров, образование которых отрицательно сказывается на свойствах материала, уменьшение вероятности их образования и, соответственно, доли участвующих в их формировании частиц, также возможно реализовать с помощью управления гранулометрией. Так, два теплоизоляционных наполнителя не должны иметь гармонирующих максимумов (табл.1) в гистограммах распределения. Так, если частицы одного наполнителя характеризуются радиусом  $r$ , то частиц другого наполнителя с радиусом  $\approx 0,3 r$  должно быть незначительное количество.

При рассмотрении проблем структурной оптимизации необходимо отметить следующее. Поверхность частиц разных компонентов композита имеет различные свойства, определяемые как химическим составом, так и структурой. В условии смешивания в сухом состоянии или в составе вяжущего теста на поверхности частиц в результате действия разных причин (электризация, пьезоэффект, образование двойных электрических слоев) образуются электрические заряды. Электростатическое взаимодействие и силы адгезии будут играть формирующую роль в образовании полиэдров наряду с геометрическими факторами. Это, в частности, можно использовать для снятия проблемы отсутствия селективности для частиц сходных размеров.

Тем не менее, геометрические факторы взаимодействия и группировки частиц, как в вяжущем материале, так и в сухих смесях, являются одними из наиболее существенных, а структурно-геометрическая оптимизация – наиболее применимой для решения проблем материаловедения и энергосберегающих технологий.

## Литература

1. А. Уэллс «Структурная неорганическая химия», М.: «Мир», 1987, т.1, 407с.
2. И. Костов «Кристаллография», М.: «Мир», 1965, 528 с.
3. А. Е. Терентьев. О пространственном распределении пор в газобетоне / А. Е. Терентьев, Г. Я. Куннос // В сб. «Технологическая механика бетона», Рига, Рижский политехн. инст., 1982, с. 143-161.
4. В. Я. Керш. Оптимизация структуры и свойств теплоизоляционных композитов на основе их дискретных моделей / В. Я. Керш, А.В. Колесников, А.В. Фощ // Вісник ОДАБА, № 51, 2013. – С. 117-123.

### МЕТОДИ СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ КОМПОЗИТІВ

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

У статті розглядаються структурні та геометричні аспекти оптимізації теплоізоляційних матеріалів. В якості модельного структурного елементу матеріалу розглядається комірка з теплоізолюючих частинок, в проміжках між якими знаходяться частинки в'язучого. Структура з таких комірок стійка до руйнування і характеризується низькою теплопровідністю. Між розмірами частинок в'язучого та теплоізолюючого заповнювача в розглянутих структурах повинні виконуватися співвідношення, які узгоджуються з кристаллографічними правилами Магнуса-Гольдшмідта. На підставі результатів гранулометричних вимірювань виявляється можливим підібрати структурно-узгоджені і неузгоджені пари заповнювач-заповнювач і заповнювач-в'язучий і тим самим здійснити один з методів структурно-геометричної оптимізації матеріалу.

### METHODS OF STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THERMAL INSULATION COMPOSITES

*V. Kersh, A. Kolesnikov, D. Kersh*

The structural and geometrical aspects of optimization of thermal insulation materials in the article are risen. As a model of the structural element of material is considered the cell which consists of insulating particles, coordinated around particles of binder. The structure of such cells are resistant to fracture and has a low thermal conductivity. The ratio between particle size of the binder and heat-insulating filler in these structures must be performed by consistent with the crystallographic rules Magnus-Goldschmidt. On the basis of grain size measurements it is possible to pick up a structurally consistent and inconsistent pairs filler-filler and filler-binder and thereby implement one of the methods of structural and geometric optimization of the material.