

Керш Владимир Яковлевич, канд. техн. наук, профессор, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина

Колесников Андрей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина

Твердохлеб Сергей Анатольевич, аспирант, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина

Vladimir Kersh, PhD in Engineering Science, Professor, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

Andrey Kolesnikov, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

Sergey Tverdochleb, postgraduate student, Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa (Ukraine)

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODELING OF ENERGY EFFICIENT BUILDING COMPOSITE MATERIAL

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается метод статистического моделирования структурно-функциональных отношений в энергосберегающем композиционном материале. Показана особая роль геометрии пористой структуры в организации теплового потока исследуемого материала и конструкций из него. Поскольку линии теплового потока проходят, в основном, по межпоровым промежуткам, с помощью методов компьютерной микроскопии, согласно разработанной методике, исследовались геометрические характеристики межпорового пространства. В результате

обработки микрофотографий материала с помощью сегментации методом водораздела выделены участки изображения, соответствующие межпоровым промежуткам. Построено гранулометрическое распределение этих участков по площадям, которое исследовалось далее интервальным методом. Доля промежутков из каждого интервала использовалась как переменная множественной регрессии к экспериментально определенным эксплуатационным свойствам. Промежутки некоторых размерных интервалов проявили сходное по знаку и интенсивности влияние на свойства, поэтому интервалы укрупнены до четырех. Для них построены нелинейные регрессионные модели свойств. В полученных регрессионных моделях для плотности, прочности и теплопроводности линейные составляющие характеризуются положительными вкладами, а квадратичные – отрицательными. Это может быть связано, в частности, с тем, что квадратичные слагаемые учитывают поры, разделяющие соседние промежутки. Определены области допустимого количества межпоровых промежутков соответствующих размеров с учетом нормативных ограничений по связанным с ними свойствам. Таким образом, оптический метод выделения межпоровых промежутков совместно с приемами статистической обработки позволяет определять структурные корреляты макроскопических свойств материала, наблюдаемых в экспериментах. Модели «структура-свойства» пригодны для прогнозирования свойств теплоизоляционных материалов рассматриваемого и смежных классов по их структуре.

ABSTRACT

The article considers the method of statistical modeling of structural-functional relations in energy-saving composite material. A special role of the geometry of the porous structure in the organization of the heat flux of the material under study and the structures from it is shown. Since the heat-flow lines pass mainly through interporous gaps, the developed methods of computer microscopy were used to study the geometric characteristics of the inter-porous space. As a result of processing the microphotographs of the material by segmentation using the watershed method, the image sections corresponding to the interporous gaps are identified. The

granulometric distribution of these sections over areas was constructed, which was further investigated by the interval method. The fraction of gaps from each interval was used as a variable of multiple regression to experimentally determined operational properties. The gaps of some dimensional intervals showed a similar in sign and intensity effect on the properties, therefore the intervals are enlarged to four. Nonlinear regression models of properties are constructed for them. In the regression models obtained, the linear components are characterized by positive contributions for density, strength and thermal conductivity, and the quadratic ones are negative. This can be due, in particular, to the fact that the quadratic terms take into account the pores that separate adjacent gaps. The regions of the allowable number of interporal gaps of appropriate size are determined, subject to regulatory restrictions on the properties associated with them. Thus, the optical method of separating the interstitial gaps together with the statistical processing methods makes it possible to determine the structural correlates of the macroscopic properties of the material observed in the experiments. The “structure-properties” models are suitable for predicting the properties of thermal insulation materials of the considered and adjacent classes by their structure.

Ключевые слова: пористая структура, межпоровые промежутки, компьютерная микроскопия, гранулометрия, нелинейная множественная регрессия

Keywords: porous structure, interporous gaps, computer microscopy, granulometry, nonlinear multiple regression

ВВЕДЕНИЕ

Одной из быстро развивающихся областей материаловедения является наука о теплоизоляционных материалах. Основной инженерной задачей в этой области является конструирование материалов, удовлетворяющих совокупности критериев оптимальности, основными из которых являются высокие теплоизоляционные свойства при минимальной плотности. Особое место здесь занимают структурированные материалы, содержащие включения с малой теплопроводностью, и в особенности поры.

Связанные друг с другом межпоровые промежутки, содержащие вяжущее, наполнитель и добавки, образуют каркас, обеспечивающий устойчивость к разрушению при приложении сжимающих и изгибающих усилий – прочности при сжатии и изгибе. Особая роль межпоровых промежутков в формировании набора эксплуатационных свойств проявляется как для конструкционных, так и для отделочных материалов и, в частности, для высоконаполненных гипсовых композиций штукатурного назначения. Решение задач оптимизации эксплуатационных характеристик этих материалов затруднено без учета влияния на свойства структурных особенностей изучаемых композиций и, в частности, геометрических свойств межпоровых промежутков.

КОМПЬЮТЕРНО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Исследование межпоровых перегородок методически упрощается, если принять гипотезу о возможности их статистически правдоподобного выделения с помощью некоторых алгоритмов сегментации изображений (рисунок 1) и, в частности, алгоритма «водораздела». Исследованию методом компьютерной микроскопии согласно разработанному алгоритму подверглись поверхности сколов 18 образцов гипсосоодержащего композиционного материала, полученных согласно плану эксперимента [1].



Рисунок 1. Алгоритм компьютерно-микроскопического исследования пористой структуры материала

Результат применения алгоритма, иллюстрирующий рассматриваемую процедуру сегментации, приведен на рисунке 2.

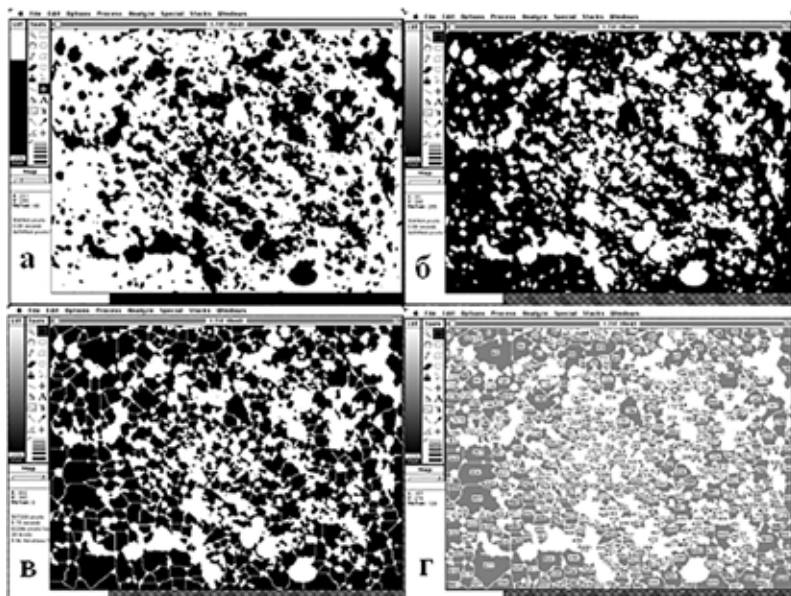


Рисунок 2. Основные этапы алгоритма выделения межпоровых промежутков: а) пороговое разделение и бинаризация; б) инверсия; в) сегментация межпорового пространства методом водораздела; г) выделение межпоровых промежутков

Форма большей части межпоровых промежутков существенно отличалась от сферической и от какой-либо правильной, в исследуемом случае стереологическая реконструкция и определение распределений по истинным размерам, площадям и объемам затруднена и представляется нецелесообразной.

Для построения регрессионных моделей «структура-свойства» в качестве основной геометрической характеристики использована видимая площадь поверхности однородных областей межпоровых промежутков, полученных рассмотренным выше методом. Использован следующий методический прием. Строились распределение относительных частот и гистограмма с фиксированным числом бинов (10) в интервале 0–0,5 мм², охватывающем 99% перегородок [2].

В таблице 1 приведены характеристики групп межпоровых промежутков, на рисунке 3 – полученная гистограмма.

Таблица 1

Характеристика групп межпоровых промежутков

| Интервал | Нижняя граница, мм ² | Верхняя граница, мм ² | Центр | Обозначение |
|----------|---------------------------------|----------------------------------|-------|-------------|
| 1 | 0 | 0,05 | 0,025 | 0_025 |
| 2 | 0,05 | 0,1 | 0,075 | 0_075 |
| 3 | 0,1 | 0,15 | 0,125 | 0_125 |
| 4 | 0,15 | 0,2 | 0,175 | 0_175 |
| 5 | 0,2 | 0,25 | 0,225 | 0_225 |
| 6 | 0,25 | 0,3 | 0,275 | 0_275 |
| 7 | 0,3 | 0,35 | 0,325 | 0_325 |
| 8 | 0,35 | 0,4 | 0,375 | 0_375 |
| 9 | 0,4 | 0,45 | 0,425 | 0_425 |
| 10 | 0,45 | 0,5 | 0,475 | 0_475 |

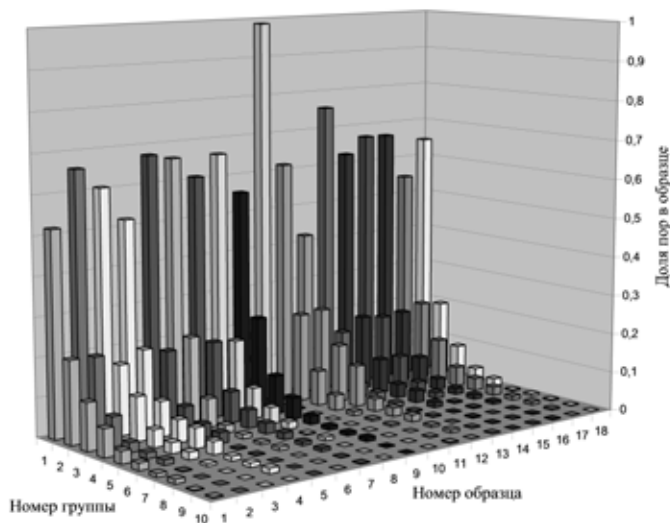


Рисунок 3. Гистограмма распределения межпоровых промежутков по 10 ареальным интервалам для 18 образцов материала

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА МЕТОДОМ МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Полученные данные позволяют перейти к статистическому анализу взаимосвязи структурных характеристик и эксплуатационных свойств материала. Эксплуатационные характеристики, полученные для 18 образцов в планированном эксперименте [1], таковы: плотность (Dens, кг/м³), прочность при сжатии (Rc, МПа) и изгибе (Rb, МПа), теплопроводность (Lamb, Вт/м·К), адгезионная прочность (Radh, МПа) и звукопроницаемость (Tau). В рассматриваемом случае идет речь о смесевой системе, суммарная доля пор равна 1. Основные результаты применения методов линейной множественной регрессии – регрессионные коэффициенты, обычный и скорректированный коэффициенты детерминации для полного числа групп приведены в таблице 2:

Таблица 2

Регрессионные модели эксплуатационных характеристик композитного материала

| Размерные группы | Регрессионные коэффициенты для свойств | | | | | |
|------------------|--|---------|--------|-------|--------|--------|
| | Dens | Rc | Rb | Lamb | Radh | Tau |
| 0_025 | 0,48 | 0,74 | 0,36 | 0,09 | 0,36 | 0,50 |
| 0_075 | 0,32 | -2,77 | -0,75 | 0,07 | -2,07 | 1,07 |
| 0_125 | 3,51 | 41,79 | 13,30 | 0,95 | 13,72 | -0,39 |
| 0_175 | -0,71 | -21,77 | -1,59 | -0,29 | -6,85 | 0,56 |
| 0_225 | -0,57 | -11,55 | -2,77 | -0,20 | -5,85 | -0,42 |
| 0_275 | -4,31 | -38,41 | -12,67 | -1,54 | 2,06 | 9,45 |
| 0_325 | -12,70 | -108,86 | -53,52 | -2,95 | -26,73 | -5,33 |
| 0_375 | 1,45 | 5,33 | 1,40 | 0,91 | 19,85 | -1,89 |
| 0_425 | 8,93 | 94,63 | 22,07 | 2,70 | 25,66 | 3,95 |
| 0_475< | 13,79 | 75,77 | 28,96 | 3,99 | -31,19 | -12,45 |
| R-sq | 81,86 | 83,75 | 80,57 | 67,52 | 52,68 | 54,27 |
| Adj R-sq | 61,46 | 65,46 | 58,72 | 30,99 | 8,10 | 1,00 |

Из приведенной таблицы видно, что зависимость для плотности, прочностей и теплопроводности характеризуются значительным коэффициентом детерминации, что свидетельствует о существенной роли межпоровых промежутков в формировании соответствующих свойств. Используемая методика может применяться для экспресс-оценивания этих характеристик материала. В то же время адгезионная прочность и звукопроницаемость существенно зависят от других структурных характеристик, относящихся, в частности, к самим порам, а также к характеру их совместного влияния на свойства – нелинейных эффектов синергизма и антагонизма [3], не обнаруживаемых линейной регрессией в рассмотренной форме.

Содержательное значение соответствующих регрессионных моделей удобно изучать также на нормированном графике влияния перегородок разной площади (рисунок 4).

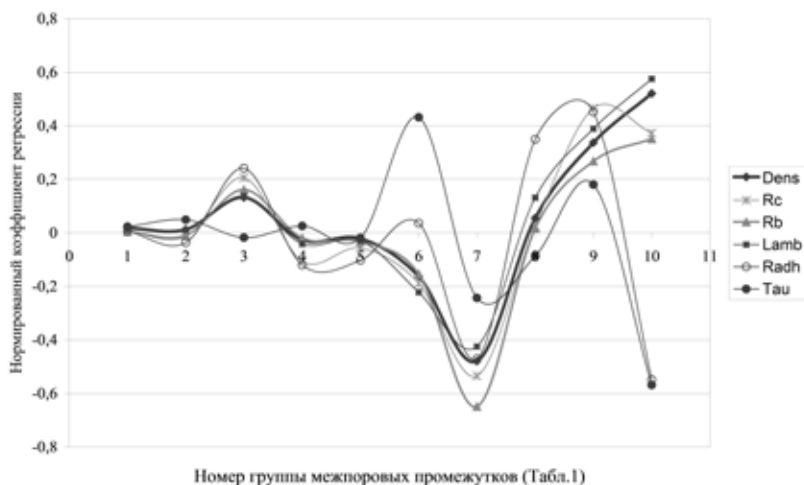


Рисунок 4. Нормированный график влияния межпоровых промежутков различных размеров на свойства материала

Из графика на рисунке 4 видно, что характер зависимостей свойств от рассматриваемой структурной характеристики

в основном определяется плотностью. Преобладание промежутков $\sim 0,15$ и $\sim 0,4-0,45$ мм² приводит к увеличению плотности, улучшению прочностных характеристик, увеличению теплопроводности. Промежутки средней группы $\sim 0,25-0,35$ мм², очевидно, окружены многими порами и тесно сосуществуют с ними в структурном ансамбле, что не характерно для групп $0,15$ и $0,4$ мм². Эти элементы могут переходить одна в другую и представлять собой своеобразный вариант вероятностной упаковки тел неправильной формы. Из графика также видно, что звукопроницаемость и отчасти адгезионная прочность характеризуются зависимостями другого типа. Одна из возможных интерпретаций зависимостей для звукопроницаемости – существенное отличие этой волновой характеристики от уже рассмотренных, проявление периодических зависимостей, связанных с резонансными явлениями. С другой стороны, адгезионные эффекты определяются свойствами поверхности экспериментальных образцов, отличающимися от характеристик материала «в объеме».

НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ УКРУПНЕННЫХ ГРУПП МЕЖПОРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Из приведенных выше данных, касающихся линейной модели, а также из графика на рисунке 4 видно, что по степени и знаку влияния на свойства некоторые соседствующие группы подобны. Представляет интерес математическая модель с укрупненными группами с учетом их нелинейного влияния на свойства. С этой целью, исходя из приведенных выше предварительных закономерностей, было осуществлено укрупнение некоторых групп и принят переход от долей промежутков в смесевой регрессионной модели к концентрациям промежутков соответствующих групп – количеству на 1 мм² препарата. Соответствующие диапазоны изменения площадей промежутков и условные названия групп приведены ниже в таблице 3, а гистограмма распределения промежутков по группам – на рисунке 5.

Характеристика укрупненных групп промежутков

| Группы | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|------|-------|-------|--------|
| Условное название | Sm_p | Med_p | Big_p | Vbig_p |
| Нижняя граница | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,35 |
| Верхняя граница | 0,1 | 0,2 | 0,35 | 0,5 |
| Середина | 0,05 | 0,15 | 0,275 | 0,425 |

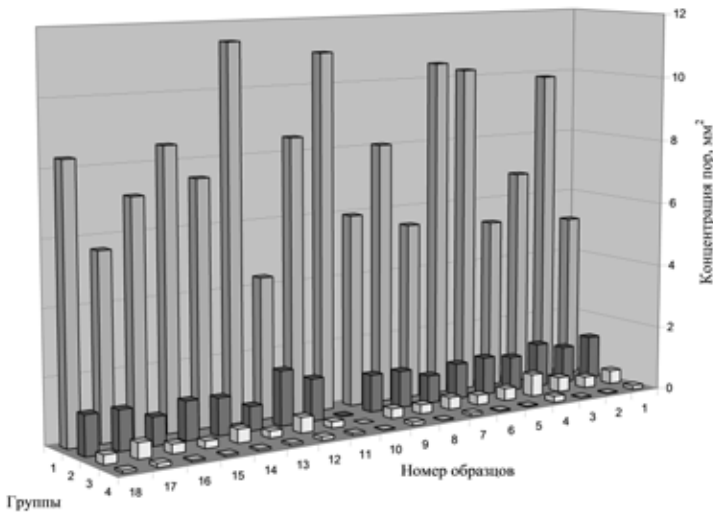


Рисунок 5. Концентрация промежутков четырех групп в исследуемых образцах

На основе полученных данных построены нелинейных регрессионных моделей, некоторые из которых приводятся ниже (обозначения в таблице 3):

1. Плотность Dens

Регрессионное уравнение и некоторые параметры модели приведены ниже (рисунок 6). Значения коэффициентов детерминации и другие параметры модели, а также приведенная графическая зависимость указывают на возможность применения рассматриваемого подхода для аппроксимации плотности. Все линейные влияния характеризуются положительными коэффициентами, почти все квадратичные – отрицательными. Это может

быть интерпретировано следующим образом. Контакт двух межпоровых промежутков, выделенных с помощью методов обработки изображения, включает также и ненаблюдаемые при данном подходе поры на границах и вокруг рассматриваемых промежутков, что приводит к отрицательным вкладам квадратичных слагаемых в плотность. Большие по модулю коэффициенты для промежутков разных размеров свидетельствуют в пользу их взаимной «упаковки», что характерно для ансамблевой структурной организации [4].

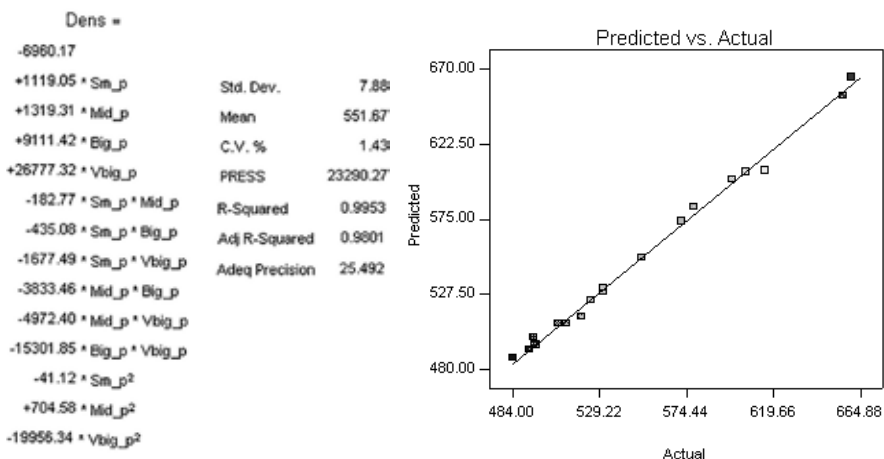


Рисунок 6. Регрессионная модель и график зависимости «наблюдаемая-предсказанная величина» для плотности

2. Прочность при сжатии Rc

Регрессионное уравнение и некоторые параметры модели приведены ниже (рисунок 7). Значения коэффициентов детерминации и другие параметры модели, а также приведенная на рисунке 7 графическая зависимость указывают на возможность применения рассматриваемого подхода для аппроксимации прочности при сжатии. Все линейные влияния характеризуются положительными коэффициентами, все квадратичные – отрицательными. Интерпретация этого факта приводится выше (для плотности). Следует также указать, что контакт межпоровых перегородок,

обрамленных порами, содержит либо непосредственно поры, либо «узкие» участки, по которым происходит распространение трещин и другие процессы разрушения. Алгоритм водораздела, используемый для выделения структурных элементов, указывает также и вероятные направления процессов разрушения, что может быть использовано в материаловедении.

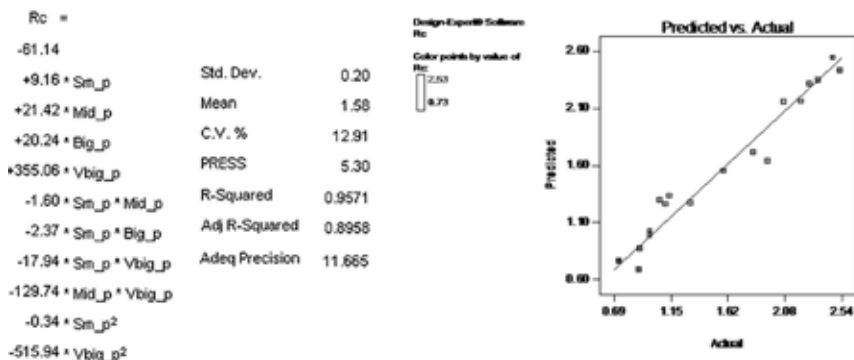


Рисунок 7. График зависимости «наблюдаемая-предсказанная величина» прочности при сжатии

3. Теплопроводность λ

Регрессионное уравнение и некоторые параметры модели приведены на рисунке 8. Значения коэффициентов детерминации и другие параметры модели, а также приведенная на рисунке 8 графическая зависимость указывают на возможность применения рассматриваемого подхода для аппроксимации теплопроводности. Все линейные влияния характеризуются положительными коэффициентами, почти все квадратичные – отрицательными. Перенос тепла осуществляется по межпоровым промежуткам. Поры представляют собой участки высокого теплового сопротивления [5]. Кроме того, поры и промежутки способны образовывать чередующиеся структуры. Они характеризуются низкой проводимостью, электрической либо тепловой [6]. Пути распространения тепла пролегают по межпоровым промежуткам, соединенным «узкими местами» в области контакта. Поровая

структура, границы раздела и «узкие места» неявно входят в квадратичные слагаемые.

Lamb =

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| -1.68 | |
| +0.28 * Sm_p | Std. Dev. 5.450E-003 |
| +0.11 * Mid_p | Mean 0.11 |
| +2.07 * Big_p | C.V. % 4.75 |
| +7.25 * Vbig_p | PRESS 0.018 |
| -0.038 * Sm_p * Mid_p | R-Squared 0.9765 |
| -0.084 * Sm_p * Big_p | Adj R-Squared 0.9001 |
| -0.37 * Sm_p * Vbig_p | Adeq Precision 11.243 |
| -0.56 * Mid_p * Big_p | |
| -2.44 * Mid_p * Vbig_p | |
| -0.011 * Sm_p ² | |
| +0.24 * Mid_p ² | |
| -0.96 * Big_p ² | |
| -9.19 * Vbig_p ² | |

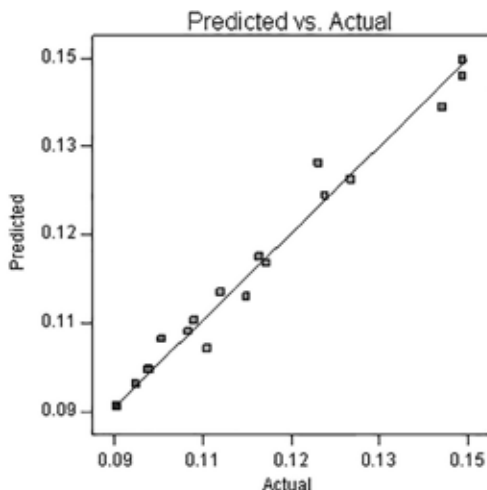


Рисунок 8. Регрессионная модель и график зависимости «наблюдаемая-предсказанная величина» для теплопроводности

СТРУКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Поскольку рассмотренные выше и подобные им регрессионные модели содержат основные уравнения взаимосвязи «структура-свойства» для поровых промежутков, представляет интерес задача структурно-ориентированной оптимизации на их основе [7]. Оптимизировались следующие эксплуатационные характеристики: плотность образцов композита (ρ , кг/м³), прочность при изгибе (R_b , МПа) и при сжатии (R_c , МПа), теплопроводность (λ , Вт/м·К), адгезионная прочность (R_{adh} , МПа), звукопроницаемость (τ). Требования, ограничения и степень важности оптимизационных факторов [1] приведены на рисунке 9, существенные ограничения выделены рамкой.

| Название | | Нижний | Верхний |
|-----------|----------|--------|---------|
| критерия | Цель | предел | предел |
| Latex | minimize | -1 | 1 |
| ρ | minimize | 450 | 600 |
| Rb | maximize | 0,5 | 1,04 |
| Rc | maximize | 1 | 2,53 |
| λ | minimize | 0,093 | 0,2 |
| RadH | maximize | 0,2 | 0,85 |
| τ | minimize | 0,3 | 0,5 |

Рисунок 9. Требования и ограничения факторов оптимизации

На основании указанных выше предельных ограничений удастся построить оверлейные графики допустимых областей – провести геометрическую оптимизацию. Целью геометрической оптимизации является построение областей допустимости структурных параметров, при которых все нормативные критерии удовлетворяются одновременно. Оптимальные значения структурных параметров принадлежат рассматриваемой области либо лежат на ее границе. При построении рассмотрены изолинии свойств на плоскости, соответствующей первым двум факторам – концентрации малых (S_{m_p}) и средних (Mid_p) промежутков при разных значениях двух остальных факторов (Big_p , $Vbig_p$). Для последних выбраны граничные и центральные значения, как при планировании эксперимента (таблица 4). Области структурных характеристик, обуславливающих допустимый набор свойств, выделены цветом (рисунок 10).

Управление образованием структуры с помощью подбора факторов рецептуры и технологии, приводящих к формированию межпоровой структуры, соответствующей допустимым областям (светлый оттенок на диаграммах на рисунке 10), позволяет тем самым получить нормативный набор характеристик композита. Осуществить это возможно с помощью статистических моделей

«рецептура-структура», строящихся с помощью аналогичных методов. Соответствующие методические приемы получения статистических моделей и последующей оптимизации эксплуатационных характеристик представляют собой универсальный алгоритм структурно-ориентированной оптимизации материала.

Таблица 4

К процедуре геометрической структурной оптимизации композита

| Характеристика | Big_p (код.) | Vbig_p (код.) | Big_p | Vbig_p |
|----------------|--------------|---------------|-------|--------|
| Нет решений | + | + | 0.690 | 0.197 |
| Нет решений | + | 0 | 0.690 | 0.106 |
| Рис. 5А | + | - | 0.690 | 0.016 |
| Нет решений | 0 | + | 0.345 | 0.197 |
| Рис. 5Б | 0 | 0 | 0.345 | 0.106 |
| Нет решений | 0 | - | 0.345 | 0.016 |
| Рис. 5В | - | + | 0 | 0.197 |
| Рис. 5Г | - | 0 | 0 | 0.106 |
| Нет решений | - | - | 0 | 0.016 |

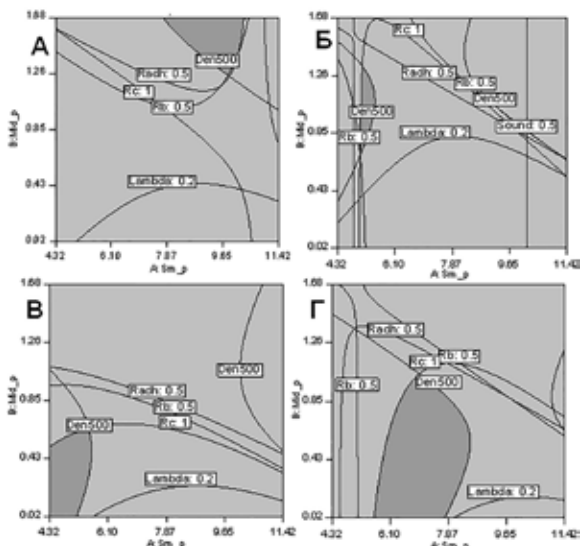


Рисунок 10. Диаграммы допустимых структурных характеристик

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, компьютерно-микроскопический метод выделения и исследования межпоровых промежутков совместно с приемами статистического анализа позволяет определять структурные корреляты эксплуатационных свойств материала, наблюдаемых в экспериментах, производить их экспресс-оценку, проводить структурно-ориентированную оптимизацию. Зависимости «структура-свойства» отличаются большей общностью по сравнению с традиционно используемыми моделями «рецептура-свойства», они позволяют охватить широкую область характеристик теплоизоляционных материалов. Кроме этого, структурное моделирование композитов позволяет их рассматривать в физическом контексте и представляется концептуальным мостом, соединяющим материаловедение с традиционными точными науками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ляшенко, Т. В. ЭС-модели и многокритериальная оптимизация при разработке теплоизоляционных гипсовых штукатурных композиций / Т. В. Ляшенко, В. Я. Керш, А. В. Колесников // Вестник ОДАБА. – 2015. – № 57. – С. 279-282.
2. Довгань, И. В. Статистическое исследование поровой структуры теплоизоляционных композитов / И. В. Довгань, В. Я. Керш, А. В. Колесников, С. В. Семенова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015.– № 60.– С. 86-90.
3. Вознесенский, В. А. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Я. П. Иванов, И. И. Николов. – К.: Будівельник, 1989. – С. 55-97.
4. Керш, В. Я. Завершенность структурных ансамблей как фактор влияния на основные свойства теплоизоляционного материала / В. Я. Керш, А. В. Колесников, В. Б. Карпенко, Д. В. Керш // Вісник ОДАБА. –2014. – № 56.– С. 110- 115.

5. Керш, В. Я. Синтез гипсовых композитных материалов на основе теории перколяции / В. Я. Керш, А. В. Колесников, Д. В. Керш // Сухие строительные смеси. – 2015. – № 3.– С. 41- 43.
6. Керш, В. Я. Методы оптимизации структурно-зависимых свойств теплоизоляционных композитов на основе их дискретных моделей / В. Я. Керш, А. В. Колесников, А. В. Фощ // Вісник ОДАБА. – 2013. – № 51.– С. 256-260.
7. Kersh, V. Structurally-Oriented Design of the Heat Insulation Plastering Material / V. Kersh, A. Kolesnikov, T. Lyashenko, M. Pidkapka // No: Proceedings of REHVA Annual Conference 2015, Latvija, Rīga, 6.-9. maijs, 2015. Rīga: RTU PRESS, 2015. pp. 241-244.

REFERENCES

1. Lyashenko T. V., Kersh V. YA., Kolesnikov A. V. ES-modeli i mnogokriterial'naya optimizatsiya pri razrabotke teploizolyatsionnykh gipsovykh shtukaturnykh kompozitsiy [ES-models and multi-criteria optimization in the development of heat-insulating gypsum plaster compositions]. *Vestnik ODABA*. 2015. No. 57. pp. 279-282. (rus)
2. Dovgan I. V., Kersh V. Ya., Kolesnikov A. V., Semenova S. V. Statisticheskoye issledovaniye porovoy struktury teploizolyatsionnykh kompozitov [Statistical study of pore structure of heat-insulating composites]. *Visnik Odeskoї derzhavnoї akademії budivnitstva i arkhitekturi*. 2015. No. 60. pp. 86-90. (rus)
3. Voznesenskiy V. A., Lyashenko T. V., Ivanov YA. P., Nikolov I. I. *EVM i optimizatsiya kompozitsionnykh materialov* [Computer and optimization of composite materials]. Kiev: Budivelnik, 1989. pp. 55-97. (rus)
4. Kersh V. Ya., Kolesnikov A. V., Karpenko V. B., Kersh D. V. Zavershennost' strukturnykh ansambley kak faktor vliyaniya na osnovnyye svoystva teploizolyatsionnogo materiala [Completeness of structural ensembles as a factor of influence

- on the basic properties of heat-insulating material]. *Visnik ODABA*. 2014. No. 56. pp. 110- 115. (rus)
5. Kersh V. Ya., Kolesnikov A. V., Kersh D. V. Sintez gipsovykh kompozitnykh materialov na osnove teorii perkolyatsii [Synthesis of gypsum composite materials on the basis of percolation theory]. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. No. 3. 2015. pp. 41-43. (rus)
 6. Kersh V. Ya., Kolesnikov A. V., Foshch A. V. Metody optimizatsii strukturno-zavisimykh svoystv teploizolyatsionnykh kompozitov na osnove ikh diskretnykh modeley [Methods for optimizing the structure-dependent properties of heat-insulating composites based on their discrete models]. *Visnik ODABA*. 2013. No. 51. pp. 256-260. (rus)
 7. Kersh V., Kolesnikov A., Lyashenko T., Pidkapka M. Structurally-Oriented Design of the Heat Insulation Plastering Material. In: *Proceedings of REHVA Annual Conference 2015, Latvija, Rīga, 6.-9. maijs, 2015*. Rīga: RTU PRESS, 2015. pp 241-244.

Статья поступила в редколлегию 03.12.2017.