

УДК 681.5:62-6:51-74

## ДЕКОМПОЗИЦИЯ СИСТЕМ И ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТОВ

**Бормотов А.Н.***ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»,  
Пенза, e-mail: aleks21618@yandex.ru*

В статье композиционный материал представляется как сложная техническая система, выполняется разделение композитов на структурные уровни, декомпозиция уровней и систем, разработка иерархической структуры показателей качества композитов при многокритериальном синтезе композитов специального назначения, разработка критериев качества математического моделирования и многокритериального синтеза композитов с применением принципов системного анализа. Вводится иерархия критериев эффективности системы (материала). В соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых задач строится иерархия систем с оценками её элементов, которая и служит основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем композитов с регулируемыми параметрами структуры и свойств. Разработанные декомпозиция систем и иерархические структуры показателей качества композиционных материалов использовались в процессе компьютерно-имитационного моделирования структуры и свойств композиционных материалов при формировании критериев оптимальности и функционала качества композитов на минеральной и полимерной основах для защиты от агрессивных факторов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, многокритериальный синтез, критерии оптимальности, декомпозиция, иерархические структуры, композиционные материалы, системный анализ

## DECOMPOSITION OF SYSTEMS AND THE HIERARCHICAL STRUCTURE OF INDICATORS OF QUALITY OF COMPOSITES

**Bormotov A.N.***FSEI of HS Penza State Technological University, Penza, e-mail: aleks21618@yandex.ru*

The article is a composite material represented as a complex technical system, the system splits the composites on structural levels, decomposition levels and systems, development of a hierarchical structure of indicators of quality of composites under multi-criteria synthesis of composites for special purposes, development of quality criteria of mathematical modeling and multicriteria synthesis of composites with the application of the principles of system analysis. Introduces a hierarchy of criteria of efficiency of the system (material). In accordance with the entered hierarchy of criteria and selected complexes of tasks build the hierarchy of systems, with estimates of its elements, which serves as the basis for forward planning of all complex developments and individual systems of composites with adjustable parameters of structure and properties. The developed decomposition systems and hierarchical structure of indicators of quality of composite materials were used in the process of computer simulation of structure and properties of composite materials in forming the criteria of optimality and cost functional composites of mineral and polymer bases for protection from aggressive factors.

**Keywords:** mathematical modeling, multicriteria synthesis, criteria of optimality, decomposition, hierarchical structures, composite materials, system analysis

Создание новых композиционных материалов (КМ) часто проводится в условиях, когда способы модификации традиционных материалов исчерпаны, а также при изменении области применения материала. Для каждого эксплуатационного воздействия устанавливаются количественное значение и границы изменения соответствующего свойства. Совокупность свойств определяет качество материала. Выделенные свойства классифицируют на экстенсивные и интенсивные. Анализ области применения, моделирование и многокритериальный синтез КМ при заданных экстенсивных свойствах (средней плотности, теплоемкости, теплопроводности и др.) являются основанием для выдвижения гипотез о видах вяжущего вещества и дисперсных фаз.

Качеством материала при моделировании и синтезе управляют с помощью ва-

рирования рецептурно-технологических факторов, выбор которых зависит от знаний о материале и технологии, фактических возможностей управления производством (уровня техники). Для этого методами математического планирования эксперимента и математическим моделированием устанавливают уравнения регрессий или вид модели для каждого свойства. При этом материал представляется в виде модели «черного ящика» (рис. 1) [4].

Такой подход пригоден для решения практических инженерных задач и установления основных закономерностей для новых композиционных материалов.

С целью обеспечения поэтапной оптимизации структуры и свойств КМ представим композиты полиструктурными и по физическим уровням и по уровням моделирования. Это позволяет значительно

расширить возможности моделирования и синтеза (рис. 2): каждый структурный уровень рассматривается как новый материал с заданными показателями качества, получение которого является самостоятельной задачей, решаемой привлечением индивидуальных рецептурных и технологических ресурсов (рецептурно-технологических факторов) [9, 1, 3].

Для КМ декомпозиция (классификация) управляющих рецептурно-технологических факторов приведена на рис. 3, где технологические факторы представлены экстенсивными (емкостными) показателями [10, 4, 5, 6]. Количество структурных уровней зависит от рецептуры композита и опыта исследователя. В общем случае выделяют микро-, мезо- и макроструктуру.



Рис. 1. Схема конструирования КМ с использованием модели «черного ящика»

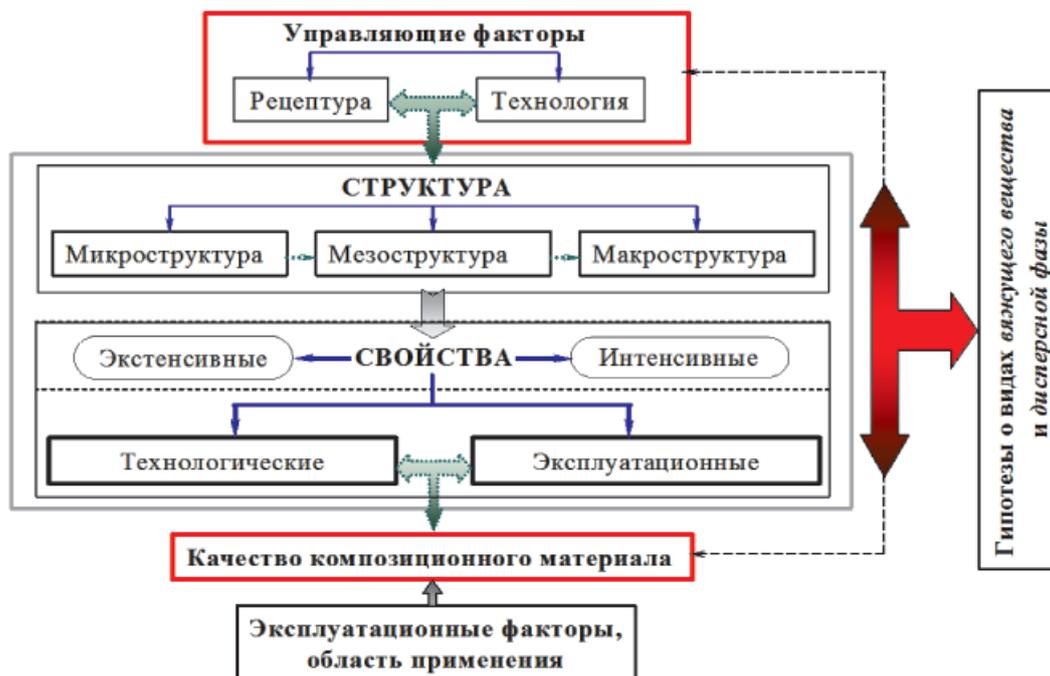


Рис. 2. Схема конструирования композита специального назначения с использованием представлений полиструктурной теории

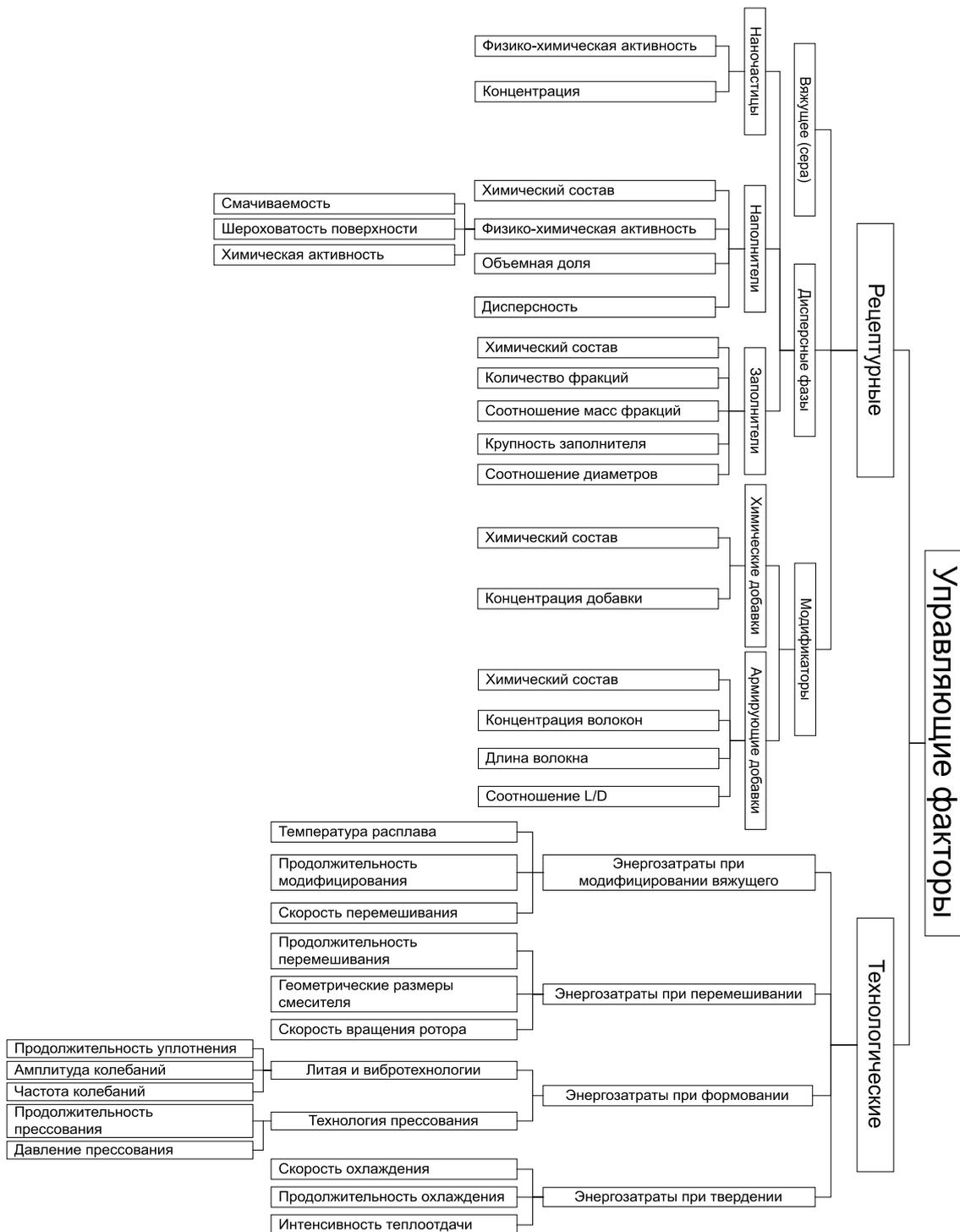


Рис. 3. Декомпозиция управляющих факторов для КМ

Моделирование свойств субмикроструктуры – атомарным или молекулярным уровнем – в настоящее время не проработано и носит частный характер, так как многообразие механизмов взаимодействия между атомами и молекулами имеет универсальный характер и не зависит от структурного уровня и вида материала.

Выделим уровень микроструктуры для композитов, получаемых на вязущих веществах, не содержащих дисперсные фазы. К таким вязущим веществам относятся синтетические смолы, термопласты, термореактивы и другие. Затвердевшие материалы на основе минеральных вязущих веществ являются композиционными,

состоящими, например, из непрореагировавших зерен вяжущего и продуктов гидратации. Такие вяжущие топологически подобны мезо- и макроструктуре, которые содержат дисперсные фазы (соответственно, наполнители и заполнители).

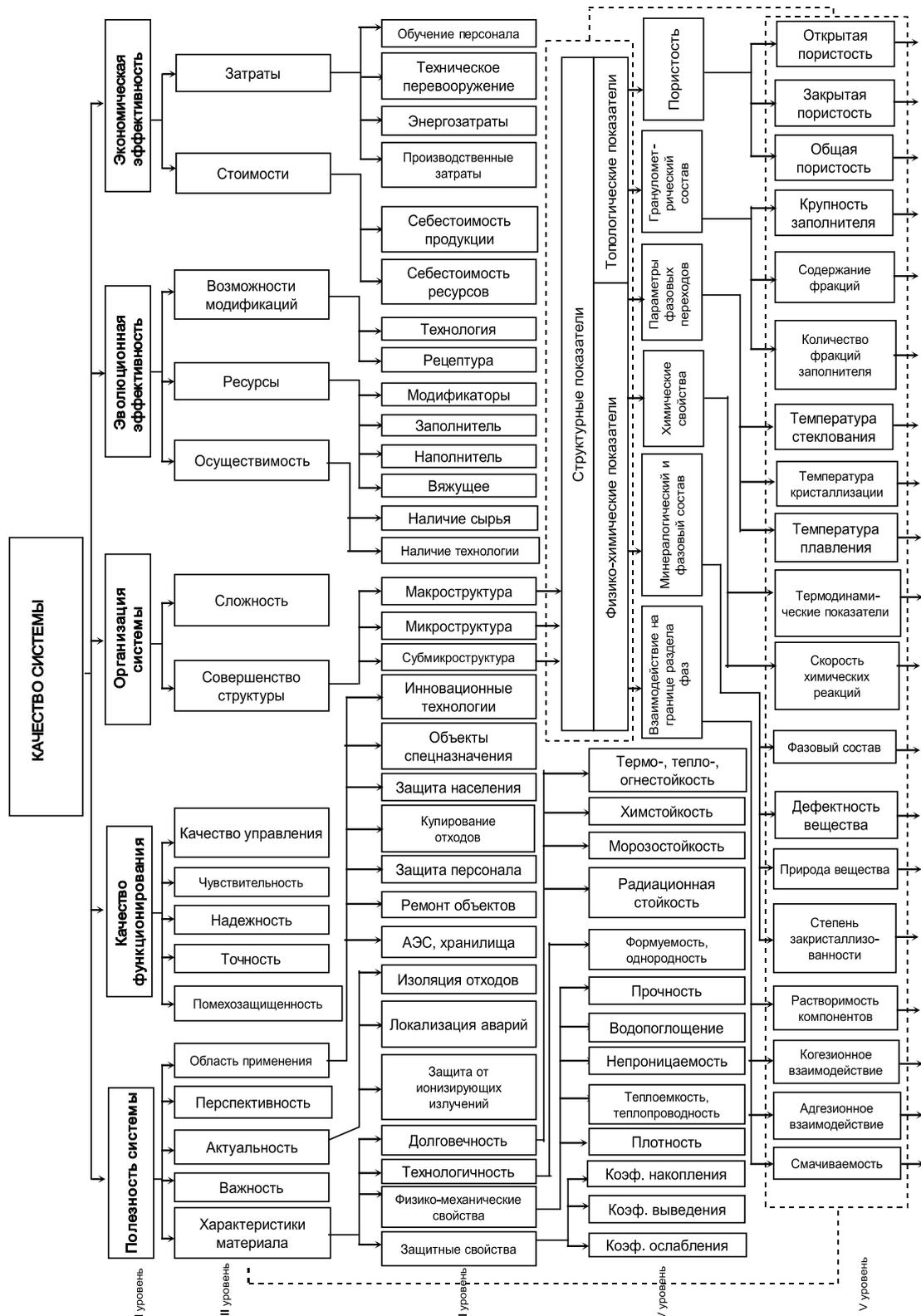


Рис. 4. Иерархическая структура критериев качества КМ

В иерархической структуре критериев эффективности защитного композита на верхнем уровне находятся следующие основные критерии: полезность системы (выходные характеристики материала, важность, актуальность, перспективность, область применения (критерии второго уровня)); качество функционирования (помехозащищенность, точность,

надежность, чувствительность, качество управления); организация системы (совершенство структуры, сложность и т.д.); эволюционная эффективность (осуществимость, ресурсы, возможности модификаций и др. характеристики развития); экономическая эффективность (рис. 4) [9, 1, 3, 7]. Декомпозиция системы в рамках этой иерархии продолжается до тех пор,

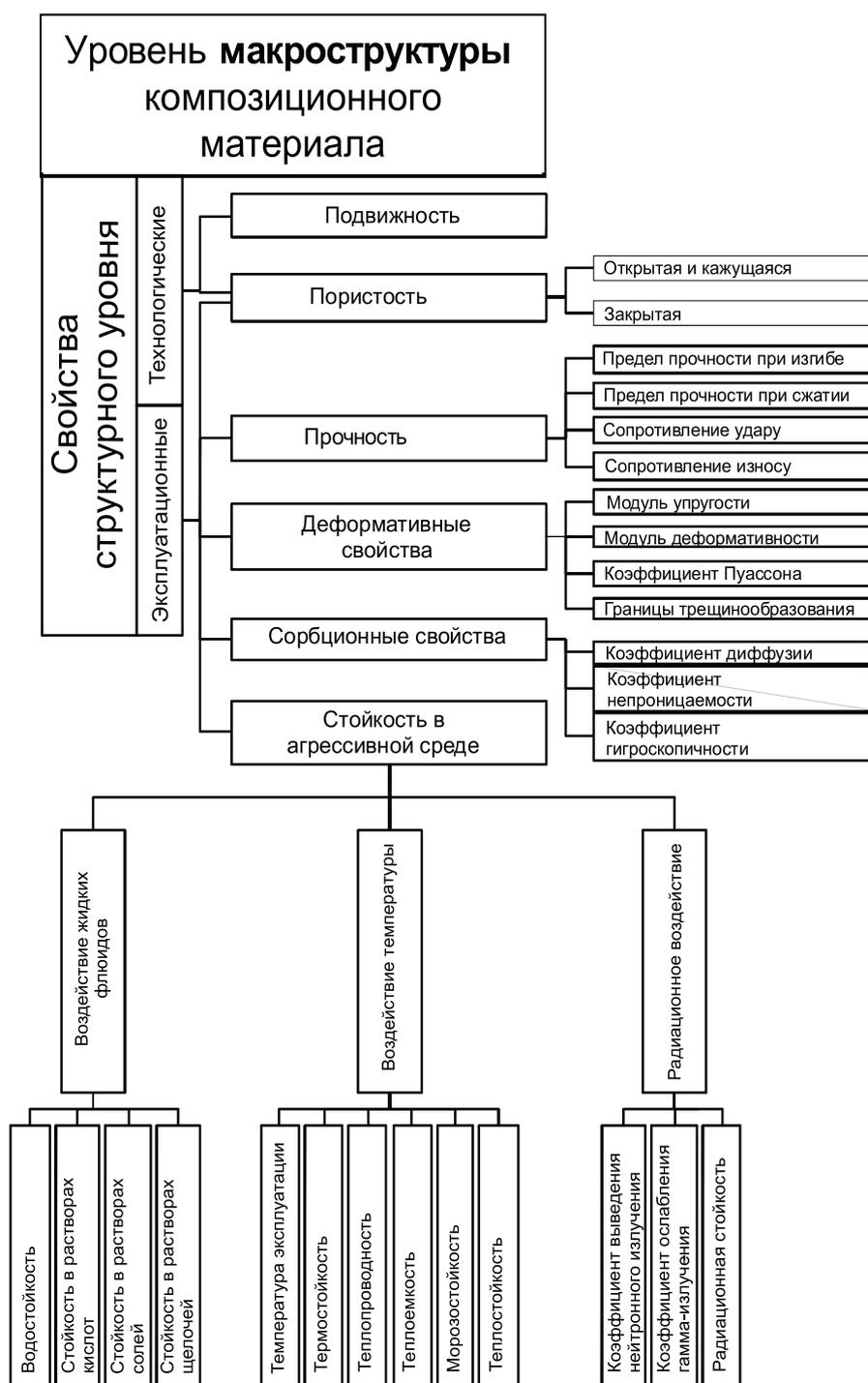


Рис. 5. Иерархическая структура макроуровня КМ

пока на нижнем уровне не будут получены элементы, принадлежащие разработанным типам, или сформулированы технические задачи создания необходимых элементов.

В соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых задач строится иерархическая структура системы – материала – с оценками её элементов, которая и служит основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем [4, 8, 10].

На рис. 5–7 приводятся иерархические структуры микро-, мезо- и макроуровневой структуры КМ.

При «переходе» на следующий структурный уровень (к новому материалу) оптимизированные рецептура и технология предыдущего уровня уточняются. Поэтому последовательное совмещение уровней (от микро- до макроструктуры) требует выделения критериев (свойств), обеспечивающих получение качественного композиционного материала на уровне макроструктуры (продукта технологии).

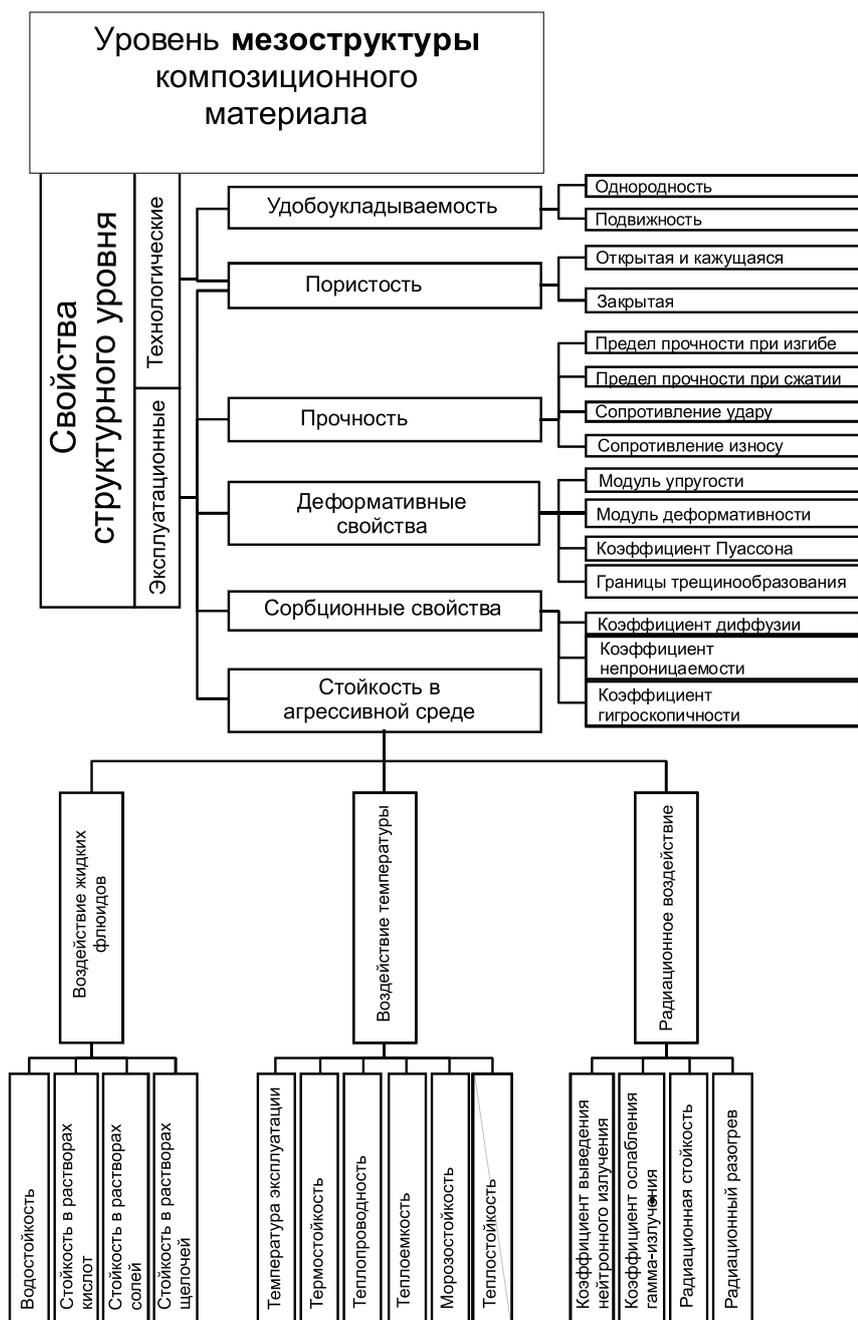


Рис. 6. Иерархическая структура мезоуровня КМ

Для топологически подобных структурных уровней, то есть содержащих дисперсные фазы, таким критерием является подвижность смеси. Часто материал (композит) рассматриваемого структурного уровня, полученный из смеси с требуемой подвижностью, обладает меньшей прочностью по сравнению с композитом, структура которого оптимизирована по прочности. Однако использование подвижной смеси обеспечивает изготовление качественного материала

на последующем структурном уровне, рецептура и технология приготовления которого определяется собственными показателями качества. В этом случае используем принцип совмещения структур, согласно которому оптимальный по выбранному показателю качества материал (структурный уровень) получают из неоптимальных предыдущих структурных уровней.

Для материалов, не содержащих дисперсные фазы, оптимизацию рецептуры

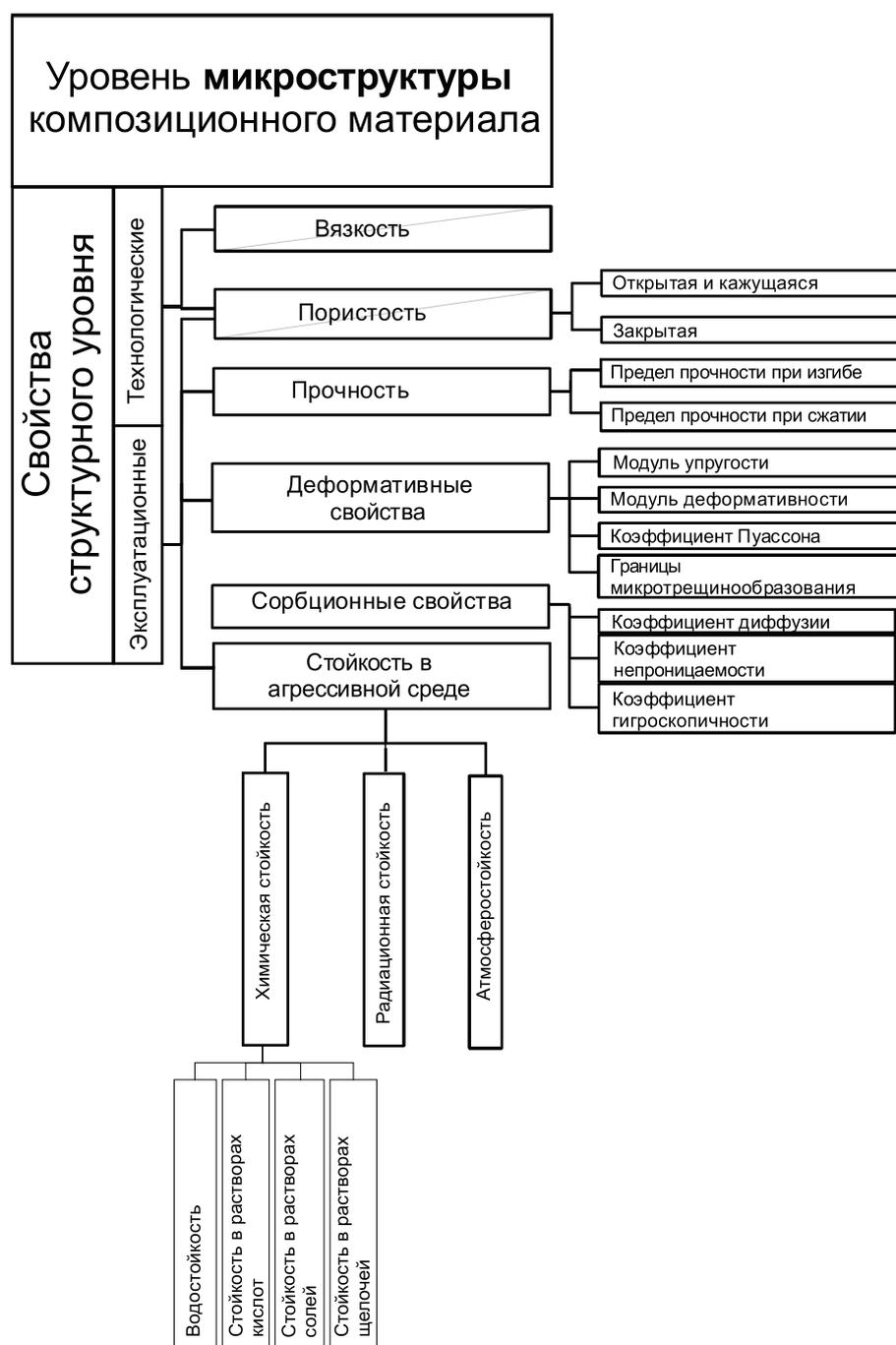


Рис. 7. Иерархическая структура микроуровня КМ

и технологии приготовления целесообразно проводить по прочности. Другие показатели качества не оптимизируются, однако принимается, что их значения должны быть в заданном диапазоне [5, 6, 7].

Определение значений рецептурно-технологических факторов, обеспечивающих получение материала с заданным качеством (многокритериальный синтез КМ), осуществляется по полученным экспериментальным зависимостям и моделям в системе компьютерно-имитационного моделирования на основе критериев качества КМ [1, 4].

Целевая функция *определяется исходя из желаемого вида* кинетических процессов формирования основных физико-механических и эксплуатационных характеристик композиционных материалов (прочность, модуль упругости, контракция и усадка, нарастание внутренних напряжений, химическая стойкость, водопоглощение и водостойкость и т.д.) на основе решения сначала общей, а затем частной задачи идентификации. Такой выбор целевой функции определяется возможностью установления связи между строением композиционного материала и проявляющимися при соответствующих условиях изменениями макроскопических характеристик.

Разработанные декомпозиция систем и иерархические структуры показателей качества композиционных материалов использовались в процессе компьютерно-имитационного моделирования структуры и свойств композиционных материалов при формировании критериев оптимальности и функционала качества композитов на минеральной и полимерной основах для защиты от агрессивных факторов.

*Статья публикуется при поддержке гранта № 3018 Базовой части Госзадания вузам на 2016 год.*

### Список литературы

1. Бормотов А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов специального назначения: дис. ... д-ра техн. наук. – Пенза, 2011. – С. 316.
2. Бормотов А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королёв. – Пенза: Изд-во ПГТА, 2011. – 352 с.
3. Бормотов, А.Н. Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемой структурой и свойствами для защиты от радиации / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, Е.В. Королёв, А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'03: Труды II Международной конференции. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2003. – С. 2437–2460.
4. Бормотов А.Н. Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, М.В. Кузнецова // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – М.: Институт системного анализа РАН, 2014. – Т. 64. – № 2. – С. 110–118.
5. Коновалов В.В. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей / В.В. Коновалов, А.В. Чупшев, В.П. Терюшков, Г.В. Шабурова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 1. – С. 135–136.
6. Коновалов В.В. Аналитическое определение параметров лопастных смесителей для турбулентного перемешивания сухих смесей / В.В. Коновалов, А.В. Чупшев, В.П. Терюшков, Г.В. Шабурова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 3 (89). – С. 88–91.
7. Таранцева К.Р. Модели и методы прогноза питтинговой коррозии / Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2010. – Т. 46. – № 1. – С. 98–106.
8. Таранцева К.Р. Проблемы коррозионной стойкости оборудования в химико-фармацевтической промышленности / Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 3. – С. 15–20.
9. Bormotov A. Methodological principles of the development and quality control of special-purpose building materials / A. Bormotov, A. Proshin, E. Korolev, A. Danilov, I. Garkina // The Journal «Scientific Israel – Technological Advantages», issue 3–4, 2002. Israel. – pp. 178 – 185.
10. Tarantsev K.V. Optimization of parameters for electrohydrodynamic emulsifiers / K.V. Tarantsev, K.R. Tarantseva // Chemical and Petroleum Engineering. – 2002. – Т. 38. – № 9–10. – С. 576–577.