

**МНОГОУРОВНЕВАЯ СТРУКТУРА БЕТОНА:
АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
СТРУКТУРЫ КОНГЛОМЕРАТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОМПОЗИТОВ**

САДОВСКАЯ Е. А., ПОЛОНИНА Е. Н., ЛЕОНОВИЧ С. Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В технологии строительных композитов (бетонов) основы структурного подхода заложены трудами отечественных и зарубежных классиков науки о строительных материалах: И.Н. Ахвердов, Н.А. Белелюбского, Н.А. Житкевича, И.Г. Малюги, Н.А. Попова, Б.Г. Скрамтаева, В.Н. Юнга, В.В. Михайлова, Ф.М. Иванова, Е. Фрейсине, и др., которые свидетельствуют, что «структурный подход» всегда считался необходимым условием построения теории материаловедения и развития технологии [1].

Первыми крупными работами по проблеме структуры бетонов были монографии В.В.Михайлова «Элементы теории структуры бетонов (1941 г.) Б.Г. Скрамтаева «Теория прочности бетона и новые виды бетонов» (1934 г.), «Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси» (1936 г.), В.Н. Юнга «Введение в технологию цемента» (1938 г.).

В.В. Михайлов утверждал, что бетон «...представляет собой трехфазную систему, состоящую из конгломератной твердой фазы (заполнитель и цементный камень), жидкой фазы (вода) и газообразной (воздух)».

В.Н. Юнг своими исследованиями рассматривал структуру бетона по ее масштабным уровням, где цементный камень назывался «микробетоном» и характеризовался в форме «сложной конструкции» из продуктов гидратации и остаточных зерен цемента.

А.Е. Шейкин исследовал элементы структуры на уровне продуктов гидратации цемента и ввел характеристический показатель этих продуктов по соотношению абсолютных объемов кристаллического ростка и гелем в единице объема новообразований.

Все это подтверждает, что «структурный подход» всегда считался определяющим условием построения теории бетонов и развития их технологии. Сегодня можно говорить о явной тенденции формирования обобщенного учения о структуре бетонов.

Эти представления формировались исходя из изучения взаимосвязи структуры и сопротивления материала механическому разрушению, его деформируемости, стойкости, на основе чего создаются основы обобщенного учения о структуре бетонов, синтезируя накопившиеся знания о структуре с дальнейшим их расширением и углублением, что является научной базой для решения прикладных задач оптимального управления технологией и качеством получаемых строительных материалов.

Основы формирования обобщенного учения заложены фундаментальными трудами И.Н. Ахвердова, Ю.М. Баженова, А.В. Волженского, Ф.М. Иванова, К.Г. Красильникова, О.П. Мчедлова-Петросяна, П.А. Ребиндера, Пауэрса Т., Тейлора Х.Ф.У. о строении цементирующих веществ и цементного камня; исследованиями Г.И. Горчакова, А.Е. Шейкина, Коупленда Л.Э., Хельмута Р.А., и др. о поровом пространстве бетонов; работами И.Н. Ахвердова, Ю.М. Баженова, С.С. Гордона, А.Е. Десова, Г.Н. Горчакова, А.И. Рыбьева, В.И. Соломатова, и др. о структуре бетона как композиционного материала.

Первый подход связан с характеристикой составных частей материала, а второй – с оценкой организации его строения. Составные части бетона технологически раскрываются как твердая, жидкая и газообразная его фазы или как цементный камень, кристаллический сросток и гель цементного камня, поры. Строение материала технологически отражается как бетон и микробетон, макро- и микро-структура или макро-, мезо- и микро-структура и т.п. При раскрытии строения материала эти подходы не применяются обособленно, а используются совместно, поскольку отражают структурные составляющие материала и особенности его построения из этих составляющих на всех его масштабных уровнях, что реализуется в работах В.В. Михайлова, В.Н. Юнга, А.Е. Шейкина, И.Н. Ахвердова, С.С. Гордона, Г.И. Горчакова, Ф.М. Иванова, А.В. Нехорошева, А.М. Подвального, В.Б. Ратинова, И.А. Рыбьева, В.И. Соломатова.

Ф.М. Иванов предложил (1969 г.) следующие уровни «сложности» структуры: 1) атомно-молекулярный; 2) первичных частиц –

микроструктур или аморфных частиц; 3) образований, состоящих из многих первичных частиц, и поровое пространство; 4) уровень элементов строительных конструкций, что обосновывал необходимостью учета взаимодействия элементов структуры между собой и с внешней средой [2, 3].

Первичным уровнем является атомно-молекулярный (субмикроскопический) уровень структуры бетона. Можно различить гидросиликаты кальция, незакристаллизованные частицы различного вида и химического состава. Между ними находится непрерывная система гелевых пор, которые могут быть сухими или заполненными жидкостью. Именно на молекулярном уровне проявляются такие свойства, как растворимость в воде, способность взаимодействовать с водой, реакционная способность по отношению к различным классам химических соединений, термическая стойкость, что определяет устойчивость бетона к агрессивной среде.

Второй уровень сложности – микроскопический. На этом уровне гидратированный цемент состоит из гидросиликатов кальция, других продуктов гидратации и непрогидратированных зерен цемента, содержит сеть пор, заполненных газами или жидкостями, характеризуется появлением поверхности раздела фаз на уровне первичных частиц - микроструктур или аморфных частиц. Величина поверхностной энергии частиц оказывает влияние на поведение их во внешней среде, и определяет адсорбционную способность поверхности, поведение при изменениях температуры и влажности, от чего зависит поведение его по отношению к жидкостям различной полярности и т.д.

На **третьем уровне** сложности возникают образования, состоящие из многих частиц (зерна песка, окруженные матрицей гидратированного цементного камня), и поровое пространство, которое характеризует одно из важнейших свойств бетона - пористость, что определяет способность бетона противостоять большинству климатических (замораживание-оттаивание, насыщение-высушивание и т.п.) и агрессивных воздействий.

Четвертый уровень сложности структуры (макроскопический) - уровень элементов конструкций и их поведение в агрессивных средах, где бетон включает крупные зерна каменного материала, окруженные растворной матрицей. Размеры конструкций, неравномерное поле напряжений ввиду различной скорости коррозии в различ-

ных частях конструкции, и неоднородности температурного поля и т.п. являются важнейшими факторами на этом уровне.

Таблица 1

«Расположение в пространстве отдельных первичных элементов и характеристики сил, соединяющих эти элементы» (по Ф.М. Иванову)

№	Название уровня	Состав уровня	Характеристика уровня
1	Субмикроскопический (атомно-молекулярный уровень)	Гидросиликаты кальция, незакристаллизованные частицы различного вида и химического состава, более или менее непрерывная система гелевых пор.	Растворимость в воде, способность взаимодействовать с водой, реакционная способность по отношению к различным классам химических соединений, термическая стойкость
2	Микроскопический (первичных частиц)	Гидросиликаты кальция, другие продукты гидратации, непрогидратированные зерна цемента, сеть пор.	Появление поверхности раздела фаз на уровне первичных частиц - микрокристаллов или аморфных частиц. Адсорбционная способность поверхности, поведение при изменениях температуры и влажности.
3	Уровень образований	Зерна песка, окруженные матрицей гидратированного цементного камня	Появляются образования, состоящие из многих частиц, и поровое пространство. Пористость, от которой во многом зависит способность бетона противостоять большинству климатических (замораживание и оттаивание, насыщение и высушивание и т.п.) и агрессивных воздействий.
4	Макроскопический (уровень элементов конструкций)	Крупные зерна каменного материала, окруженные матрицей раствора	Поведение в агрессивных средах - проявление таких факторов, как размеры конструкций, образование неравномерного поля напряжений из-за различной скорости коррозии в различных частях конструкции, из-за неоднородности температурного поля и т.п.

Субмикроскопический (атомно-молекулярный уровень)	Гидросиликаты кальция, незакристаллизованные частицы различного вида и химического состава, более или менее непрерывная система гелевых пор.
Микроскопический (уровень первичных частиц)	Гидросиликаты кальция, другие продукты гидратации, негидратированные зерна цемента, сеть пор.
Уровень образований	Зерна песка, окруженные матрицей гидратированного цементного камня.
Макроскопический (уровень элементов конструкций)	Крупные зерна каменного материала, окруженные матрицей раствора.

Рис. 1. Уровни сложности строения бетона [4]

В.Б. Ратинов и Т.И. Розенберг (1973 г.) развили представления Ф.М. Иванова, рекомендовав различать: 1) надмолекулярный уровень с размером частиц в интервале $10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-9}$ м; 2) субмикроскопический уровень с размером частиц в пределах $5 \cdot 10^{-9} \div 10^{-7}$ м; 3) микроскопический уровень, отвечающий интервалу размера структурных элементов $10^{-7} \div 10^{-4}$ м; 4) макроскопический уровень с размером элементов структуры, превышающим 10^{-4} м. Выделенные масштабные уровни не связываются с функциональным назначением составных частей бетона, не показывается их взаимообусловленность, поэтому эта классификация представляется недостаточно систематичной. В каждый масштабный уровень входит большой набор элементов, введение количественных оценок параметров структуры на каждом масштабном уровне, поэтому представляется проблемным.

Таблица 2

Структура по В.Б. Ратинову и Т.И. Розенбергу

№	Название уровня	Состав уровня	Характеристика уровня
1	Надмолекулярный уровень	Частицы, отвечающие по размерам устойчивым трехмерным зародышам новообразований	$10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-9}$ м
2	Субмикроскопический уровень	Основная масса гидратных новообразований, не полностью гидратированные зерна вяжущего вещества, значительная часть капилляров	$5 \cdot 10^{-9} \div 10^{-7}$ м
3	Микроскопический уровень	Частицы вяжущего вещества, некоторые новообразования, дефекты структуры в виде микротрещин, микрокапилляры	$10^{-7} \div 10^{-4}$ м
4	Макроскопический уровень	Крупные воздушные пузырьки, каверны, раковины	превышающим 10^{-4} м

Надмолекулярный уровень	10^{-9} $\div 5 \cdot 10^{-8}$ м	Включает частицы, отвечающие по размерам устойчивым трехмерным зародышам новообразований
Субмикроскопический уровень	$5 \cdot 10^{-9} \div 10^{-7}$ м	Попадает основная масса гидратных новообразований, не полностью гидратированные зерна вяжущего вещества, значительная часть капилляров
Микроскопический уровень	$10^{-7} \div 10^{-4}$ м	Частицы вяжущего вещества, некоторые новообразования, дефекты структуры в виде микротрещин, микрокапилляры капилляров
Макроскопический уровень	превышающий 10^{-4} м	Отнесены крупные воздушные пузырьки, каверны, раковины

Рис. 2. Уровни сложности строения бетона

А.М. Подвальный рассматривает (1973 г.) бетон «как двухфазный материал и из упруго-пластической матрицы (вяжущего), с включениями зерен заполнителя, связанные с матрицей по поверхности контакта» и предлагает исследовать строение бетона на трех структурных уровнях: на уровне цементного камня (в виде системы гидратированной массы цемента с включениями непрореагировавших зерен клинкера), цементно-песчаного раствора (системы цементного камня с включениями мелкого заполнителя) и собственно бетона (системы раствора с крупным заполнителем). Бетон по А.М. Подвальному характеризуется структурой типа «конгломерат в конгломерате».

Таблица 3

«Конгломерат в конгломерате» по А.М. Подвальному

№	Название уровня	Состав уровня
1	цементный камень	система гидратированной массы цемента с включениями непрореагировавших зерен клинкера
2	цементно-песчаный раствор	цементный камень с включениями мелкого заполнителя
3	собственно бетон	система раствора с крупным заполнителем

По П.А. Мельниченко (1974 г.) структура бетона есть система взаимо-включающих «структурных формаций»: макроструктуры с размером зерен $10^1 \div 10^0$ см, мезоструктуры ($10^{-1} \div 10^{-2}$ см), субмезоструктуры ($10^{-2} \div 10^{-3}$ см), микроструктуры ($10^{-2} \div 10^{-4}$ см) и субмикроструктуры ($10^{-5} \div 10^{-7}$ см). Каждой формации соответствует связующая матрица: растворная составляющая бетона, минеральный микробетон, «микробетон Юнга», цементный камень, коагуляционно-кристаллизационная система гидратных новообразований. В

этой классификации масштабных уровней отражается функциональная роль структурных составляющих и их взаимообусловленность, где каждая структурная формация есть двухкомпонентная система из зерен одного размера и связующего вещества (матрицы). Автор не рассматривает состав и строение индивидуальных частиц в новообразованиях, структурные дефекты, вводит одновременно термины «минеральный микробетон Юнга» и «цементный камень».

Таблица 4

Система взаимо-включающих «структурных формаций»
по П.А. Мельниченко

№	Название уровня	Состав уровня	Характеристика уровня
1	макроструктуры	растворная составляющая бетона	$10^1 \div 10^0$ см
2	мезоструктуры	минеральный микробетон	$10^{-1} \div 10^{-2}$ см
3	субмезоструктуры	«микробетон Юнга»	$10^{-2} \div 10^{-3}$ см
4	микроструктуры	цементный камень	$10^{-2} \div 10^{-4}$ см
5	субмикроструктуры	коагуляционно-кристаллизационная система гидратных новообразований	$10^{-5} \div 10^{-7}$ см

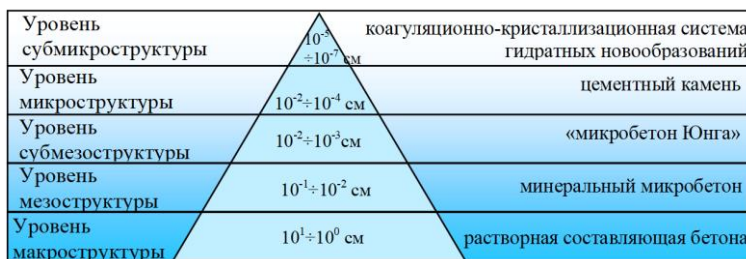


Рис. 3. Уровни сложности структуры

В.И. Соломатов (1977 г.) представил «полиструктурную теорию» композиционных строительных материалов, где бетоны являются полиструктурными, то есть состоят из многих структур (от атомных и молекулярных до макроструктур), переходящих одна в другую исходя из принципа «структура в структуре». Для практической технологии автор считает достаточным рассмотрение структуры на двух уровнях: микро- и макроструктуры.

А.В. Нехорошева (1977 г.) предлагает оценивать структуру материалов, исходя из масштаба частиц, и выделяется пять уровней: субмикроскопический, микроскопический, мезоскопический, макроскопический и мегаскопический. Структура рассматривается на каждом уровне как система из двух композиционных частей - матрицы и «решетки». На мегаскопическом уровне структура бетона состоит из матрицы раствора и решетки крупного заполнителя, на макроскопическом уровне - из цементного камня и мелкого заполнителя, на мезоскопическом уровне - из глобул цементного камня и макропор, на микроскопическом уровне - из кристаллов цементного камня и микропор, на субмикроскопическом уровне - из атомов (ионов, молекул) цементирующего вещества и электронов внешних (валентных) слоев». В разработках раскрывается содержание каждого из масштабных уровней и указывается на их связь с явлениями и процессами структурообразования.

Таблица 5

«Система из матрицы и «решетки» по А.В. Нехорошеву

№	Название уровня	Состав уровня
1	субмикроскопический	из атомов (ионов, молекул) цементирующего вещества и электронов внешних (валентных) слоев
2	микроскопический	из кристаллов цементного камня и микропор
3	мезоскопический	из глобул цементного камня и макропор
4	макроскопический	из цементного камня и мелкого заполнителя
5	мегаскопический	из матрицы раствора и решетки крупного заполнителя



Рис. 4. Уровни сложности структуры бетона

Описание строения композита предполагает характеристики не только составных частей на разных масштабных уровнях, но и раскрытия взаимосвязи структурных элементов в пределах как отдельного масштабного уровня, так и между уровнями. Система представлений о строении бетонов должна базироваться на использовании метода анализа для рассмотрения материала на масштабных структурных уровнях, метода синтеза для исследования связи элементов и уровней в структуре материала с учетом их взаимообусловленности. При выделении составных частей материала на разных масштабных уровнях необходимы: аналитическое описание, количественное измерение и технологическое регулирования для практического управления свойствами материала.

Включения в бетонах как структурные элементы играют структурообразующую роль, но являясь своеобразными дефектами при действии силовых и несиловых нагрузок становятся концентраторами напряжений. Концентрация напряжений в бетонах носит локальный характер в виду гетерогенного строения [5], при этом формируется неоднородное в объеме материала поле напряжений.

Каждому из масштабных уровней соответствует свой структурный элемент (включение) как концентратор напряжений.

В крупнозернистом бетоне роль матрицей является мелкозернистый бетон, включениями - зерна заполнителя, и макропоры.

В мелкозернистом бетоне матрица - цементный микробетон, включения - зерна заполнителя, поры воздухововлечения.

На масштабном уровне цементного микробетона роль матрицы играет цементирующее вещество, роль включений - непрореагировавшие зерна цемента.

Цементирующее вещество состоит из матрицы (кристаллического сростка) и включений - пор цементирующего вещества.

Кристаллический сросток цементирующего вещества как масштабный уровень структуры рассматривается как композит особого типа, где неоднородность создается контактами кристаллов.

В отдельном кристалле матрица - кристаллическая решетка из анионов и катионов, включения (неоднородности) - вакансии, замещения, дислокации, поверхностные трещины кристалла (таблица 6).

Концентрация напряжений в материале возникает вблизи включений на всех его масштабных уровнях структуры, и на каждом последующем уровне структуры материала будет возрастать от дей-

ствия включений каждого предыдущего уровня структуры. Максимальные напряжения на последующем уровне структуры будут возникать в зонах максимальной концентрации напряжений предыдущего уровня структуры, в результате напряжения, образования, развития трещины и фрагментации материала больше расчетного напряжения. Максимальное локальное напряжение в бетоне зависит от ряда факторов:

$$\sigma_{\max} = f(k_1, k_2, \dots, k_n) \sigma_0 \quad (1)$$

где σ_{\max} – максимальное локальное напряжение образования, развития трещины и фрагментации бетона;

σ_0 – расчетное напряжение от действия нагрузки;

k – коэффициент перехода по "n" масштабным уровням.

Напряженное состояние бетонов при силовых и несиловых воздействиях зависит от концентрации и локализации напряжений на всех масштабных уровнях структуры

Таблица 6

Концентраторы напряжений на разных масштабных уровнях

№	Масштабный уровень	Матрица	Концентраторы напряжений
1	отдельного кристалла	кристаллическая решетка из анионов и катионов	вакансии, замещения, дислокации, поверхностные трещины кристалла
2	кристаллического сростка	кристаллит	контакты кристаллов
3	цементирующего вещества	кристаллический сросток	поры цементирующего вещества
4	цементного микробетона	цементирующее вещество	непрореагировавшие зерна цемента
5	мелкозернистого бетона	цементный микробетон	зерна заполнителя, поры воздухововлечения
6	крупнозернистого бетона	мелкозернистый бетон	зерна заполнителя, макропоры

Выделены 4 уровня трещинообразования и дисперсного армирования строительных композиционных материалов:

макрмасштабный уровень (крупнозернистый бетон), где матрица – мелкозернистый бетон, армирующие элементы – традиционная рабочая арматура;

мезомасштабный уровень (мелкозернистый бетон), где матрица – цементный микробетон, дисперсное армирование – армирующие элементы длиной 1...5 см и диаметром 0,1...0,8 мм (стальные, минеральные, углеродные и другие виды волокон);

микромасштабный уровень (цементный микробетон), где матрица – цементирующее вещество, армирование – волокна длиной 1...5 мм и диаметром 10...50 мкм (различные виды стекловолкна, асбестовые и другие минеральные волокна);

субмикромасштабный уровень (цементирующее вещество), где матрица – кристаллические морфологические новообразования. Трещины и поры перекрываются кристаллогидратами новообразований длиной до 3... 5 мкм, либо вводят нитевидные кристаллы гидросиликатов кальция (таблица 7, 8).

Таблица 7

«Масштабные уровни структуры композитов: структурные элементы (включения), как концентраторы напряжений»
по Е.М. Чернышову

№	Масштабный уровень	Матрица	Концентраторы напряжений	Армирующие элементы
1	2	3	4	5
1	отдельный кристалл	кристаллическая решетка из анионов и катионов	вакансии, замещения, дислокации, поверхностные трещины кристалла	
2	кристаллический сросток	кристаллит	контакты кристаллов	
3	цементирующее вещество	кристаллический сросток	поры цементирующего вещества	кристаллогидраты новообразований длиной до 3... 5 мкм; нитевидные кристаллы гидросиликатов кальция
4	цементный микробетон	цементирующее вещество	непрореагировавшие зерна цемента	различные виды стекловолкна, асбестовые и другие минеральные волокна; длиной 1..5 мм и диаметром 10..50 мкм

1	2	3	4	5
5	мелкозернистый бетон	цементный микробетон	зерна заполнителя, поры воздухововлечения	стальные, минеральные, углеродные и другие виды волокон; длиной 1..5 см и диаметром 0,1..0,8 мм
6	крупнозернистый бетон	мелкозернистый бетон	зерна заполнителя, макропоры	традиционная рабочая арматура

Таблица 8

Схема многоуровневого дисперсного армирования

№	Масштабный уровень	Матрица	Концентраторы напряжений	Армирующие элементы
1	отдельного кристалла	кристаллическая решетка из анионов и катионов	вакансии, замещения, дислокации, поверхностные трещины кристалла	
2	кристаллического сростка	кристаллит	контакты кристаллов	
3	цементирующего вещества	кристаллический сросток	поры цементирующего вещества	относительно протяженными кристаллогидратами новообразований длиной до 3... 5 мкм; нитевидные кристаллы гидросиликатов кальция
4	цементного микробетона	цементирующее вещество	непрореагировавшие зерна цемента	различные виды стекловолокна, асбестовые и другие минеральные волокна; длиной 1..5 мм и диаметром 10..50 мкм
5	мелкозернистого бетона	цементный микробетон	зерна заполнителя, поры воздухововлечения	стальные, минеральные, углеродные и другие виды волокон; длиной 1..5 см и диаметром 0,1..0,8 мм
6	крупнозернистого бетона	мелкозернистый бетон	зерна заполнителя, макропоры	традиционная рабочая арматура

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов Е.М. Уровни организации и иерархия структуры строительных композитов в строительных конструкциях / сборник статей по материалам 7-й международной научной конференции «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» том 2: Воронеж, 2013 – с.129-164.
2. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
3. Долговечность конструкций из бетона и железобетона: учебное пособие для студентов / А. В. Ферронская. - Москва: Изд-во Ассоц. строительных вузов (АСВ), 2006. - 335 с.
4. Чернышов Е.М. Уровни организации и иерархия структуры строительных композитов в строительных конструкциях / сборник статей по материалам 7-й международной научной конференции «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» том 2: Воронеж, 2013 – с.129-164
5. Коротких Д.Н. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого цементного бетона и повышение его трещиностойкости» – Воронеж 2001.

УДК 620.179.16

О МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ БЕТОНА

СНЕЖКОВ Д. Ю., КОНДРАТЕНКО А. А., ПОТЕС Т. А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Ультразвуковой импульсный метод контроля является активным методом испытаний, основанным на существовании корреляции скорости распространения ультразвукового (УЗ) импульса и контролируемого физико-механического параметра бетона, в частности, - его прочности. В настоящее время порядок измерения скорости импульса (но не интерпретация полученного значения) регла-