

А.И. МАКЕЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТА МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ РАЗРУШЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРЕ КОНГЛОМЕРАТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ¹

Аннотация. В публикации конгломератные строительные композиты (бетоны) идентифицируются как гетерогенные твёрдые тела с иерархически организованной пространственно-геометрической структурой характеристической размерностью от 10^{-10} до 10^{-1} м, обладающей минимум 5-6 масштабными уровнями и тремя типами конструкции подструктур, различающихся по своему масштабу, генезису и механике проявления свойств. Первый тип характерен для макро-, мезо- и микромасштабного уровней и принимается в виде двухкомпонентной «конструкции» из пространственно непрерывной матрицы и детерминировано-стохастически распределённых в ней дискретных твёрдых и газообразных (макропоры) включений; второй тип относится к субмикро-, ультрамикро- и наномасштабным уровням и полагается в виде «микромасштабной пространственной конструкции» новообразований цементирующего вещества из консолидированных индивидуальных кристаллических разностей; третий тип, наконец, соответствует атомно-молекулярному строению новообразований цементирующего вещества. Дается характеристика выделяемых типов подструктур по масштабу слагающих их компонентов, особенностям формирования, механике проявления свойств, критериям конструирования и средствам синтеза каждой подструктуры.

Анализируются закономерности формирования маршрута трещины разрушения в подструктурах всех типов и субстанции каждого масштабного уровня. При этом развитие напряженно-деформированного состояния конгломератного композита по принципу диссипации энергии, локализации и повышения (концентрации) напряжений реализуется в направлении от макро- к атомно-молекулярному уровню структуры композита, а само же разрушение и, соответственно, формирование маршрута трещины во времени и в пространстве композита проходит в направлении от атомно-молекулярного уровня к макроуровню каскадно через все промежуточные структурные уровни. В рамках интегрированного механо-физико-химического подхода показывается место термофлуктуационной теории (физика разрушения) на этапах разрыва единичных атомно-молекулярных связей и механики трещин на этапах развития микро- и макроповреждений. Обсуждаются возможности применения теоретических закономерностей формирования маршрута трещины для постановки и решения практических задач конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных композитов.

Ключевые слова: конгломератные строительные композиты, масштабные уровни структуры композитов, физика разрушения, механика трещин, маршрут трещины в многоуровневой структуре.

А.И. МАКЕЕВ¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

FORMATION OF THE ROUTE OF THE MAIN CRACK OF DESTRUCTION IN THE MULTI-LEVEL STRUCTURE OF CONGLOMERATE BUILDING COMPOSITES¹

Abstract. In the publication, conglomerate building composites (concrete) are identified as heterogeneous solids with a hierarchically organized spatial-geometric structure with a characteristic

© Макеев А.И., 2023

¹ Статья посвящена памяти академика РААСН, д.т.н., профессора Евгения Михайловича Чернышова (1936-2021)
№ 5 (109) 2023

dimension from 10-10 to 10-1 m, with a minimum of 5-6 scale levels and three types of substructure design that differ in scale, genesis and mechanics of properties manifestation. The first type is characteristic of the macro-, meso- and microscale levels and is taken in the form of a two-component "construction" of a spatially continuous matrix and discrete solid and gaseous (macropores) inclusions deterministically and stochastically distributed in it; the second type refers to the submicro-, ultra-micro- and nanoscale levels and is believed to be in the form of a "microscale spatial structure" of new formations of a cementitious substance from consolidated individual crystalline differences; the third type, finally, corresponds to the atomic-molecular structure of new formations of the cementing substance. Characteristics of the distinguished types of substructures are given according to the scale of their components, the peculiarities of formation, the mechanics of manifestation of properties, design criteria and means of synthesis of each substructure.

The patterns of formation of the fracture route in substructures of all types and substances of each scale level are analyzed. In this case, the development of the stress-strain state of the conglomerate composite according to the principle of energy dissipation, localization and increase (concentration) of stress is realized in the direction from the macro- to the atomic-molecular level of the structure of the composite, and the destruction itself and, accordingly, the formation of the crack route in time and in space of the composite passes in the direction from the atomic-molecular level to the macrolevel in a cascade through all intermediate structural levels. Within the framework of an integrated mechano-physico-chemical approach, the place of thermofluctuation theory (fracture physics) at the stages of breaking single atomic-molecular bonds and crack mechanics at the stages of development of micro- and macrodamage is shown. The possibilities of using theoretical principles of crack route formation to formulate and solve practical problems of designing and synthesizing optimal structures of conglomerate building composites are discussed.

Keywords: conglomerate building composites, scale levels of the structure of composites, fracture physics, fracture mechanics, crack path in a multilevel structure.

Введение

Понятие «трещиностойкость» является ключевым в характеристике сопротивления конструкционных материалов разрушению. Более того, это, можно сказать, интегрирующее понятие, поскольку оно отражает существо механизма проявления ими работоспособности и надежности, как это показано в работах З. Бажанта, С. Дамонда, Т. Екобори, Ю.В. Зайцева, Р. Кристенсена, Ф.Ф. Ленга, Ф. Макклиттока, В.З. Партона, П. Строевона, Г.П. Черепанова. Действительно, исчерпание потенциала сопротивления материалов и конструкций разрушению начинается с момента зарождения и образования в них трещин [1-3].

Практически все конструкционные материалы по типу своего разрушения относятся к квазихрупким, обладая большей или меньшей мерой упругости, вязкости и пластичности, то есть большей или меньшей склонностью к образованию в них трещин. Не случайно для них используют понятие «предел трещинообразования», которое связывается с реологическими характеристиками материала и параметрическими точками его деформирования в процессе сопротивления разрушению [4-7].

В теории и практике расчета строительных конструкций используется концепция первой и второй группы предельных состояний. И та и другая группа прямо соотносятся с явлениями трещинообразования в материалах при силовом нагружении конструкций. Принимаемое при этом феноменологическое рассмотрение трещиностойкости, применимое и, более того, удобное для построения моделей механики конструкционных композитов, должно на современном этапе развития их материаловедения и технологии смениться системно-структурными представлениями, отражающими связь, существо поведения композитов, параметров их реологических моделей с особенностями их состава, структуры и состояния, которые являются предметом управления в технологиях получения композитов и средством обеспечения требуемых их свойств (методология формулы «4С» [8]).

Механизм и природа, качественная и количественная реализация потенциала трещиностойкости материалов интересны и важны именно с позиций структурного подхода, обеспечивающего основы для решения задач конструирования структур высокотехнологичных строительных композитов с новыми возможностями по функционально-конструкционным свойствам.

Данная публикация, как раз, связана с рассмотрением проблемы трещиностойкости

конгломератных строительных композитов (бетонов) именно в такой постановке.

Идентификация структуры конгломератных строительных композитов.

С позиций системно-структурного подхода в строительном материаловедении «бетоны — это структурированные твёрдые тела, композиты с конгломератной структурой, наделённые признаками субстанциональности, многофазности, полиструктурности, масштабной многоуровневости, детерминированности, стохастичности и диалектичности» [9]. При всем многообразии и специфичности конгломератных строительных композитов (бетонов), в их целостной гетерогенной иерархически организованной структуре с учётом явлений её синтеза, механики проявления свойств и процессов разрушения можно и целесообразно выделять три типа подструктуры (таблица 1).

Введённые к рассмотрению типы структур с их генезисом объективно «присутствуют» в неорганических конгломератных строительных композитах на гипсовой, известковой, цементной, силикатной, керамической основе, определяя широкую номенклатуру плотных, поризованных, ячеистых бетонов.

Рассматривая в общей постановке проблему трещиностойкости конгломератных строительных композитов, принципиально важно выделить положение о том, что они с их многоуровневой по масштабу и иерархии структурой проявляют себя как «преобразователи» (своего рода, трансформаторы) энергии внешних механических и других энергетических воздействий в энергию напряжений структурных связей. Такое преобразование, трансформация состоит во взаимосвязанных явлениях диссипации энергии (ее рассеяния, распределения) по макрообъему материала в конструкции и соответствующей локализации (размещения, местоположения) напряжений с их концентрацией (средоточием) в микрообъемах структуры материала в его структурных связях.

Формирование напряженно-деформированного состояния конгломератного композита реализуется по принципу диссипации энергии, локализации и повышения (концентрации) напряжений в направлении от макро- к атомно-молекулярному уровню структуры композита [10]. Само же разрушение и, соответственно, формирование маршрута трещины во времени и в пространстве композита проходит в направлении от атомно-молекулярного уровня к макроуровню каскадно через все промежуточные структурные уровни [11]. Соответственно этому, маршрут магистральной трещины в структуре композита уместно будет анализировать в направлении от субстанции новообразований к композитной структуре бетона.

Таблица 1 - Характеристика подструктур конгломератных строительных композитов

Характеристический признак	Тип подструктуры		
	I (конгломератный композит)	II (микроконструкция)	III (сплошная среда)
«Занимаемые» уровни целостной структуры	макро-, мезо- и микромасштабные	субмикро-, ультрамикро- и наномасштабные	наномасштабный и атомно-молекулярный
Размерный диапазон структурных элементов, м	$10^{-1} - 10^{-(4\div5)}$	$10^{-(4\div5)} - 10^{-(8\div9)}$	$10^{-8} - 10^{-10}$
Описание строения	двухкомпонентная «конструкция» из пространственно непрерывной матрицы и детерминировано-стохастически распределённых в ней дискретных включений; сплошное гетерогенное тело	«микромасштабная пространственная конструкция» новообразований цементирующего вещества из консолидированных индивидуальных кристаллических разностей	твёрдофазная субстанция индивидуальных скрытокристаллических или кристаллических новообразований; сплошное монофазное тело, наделённое несовершенствами (дефектами) в форме вакансий, замещений, дислокаций
Генезис	продукт формирования «системы сложения»	продукт взаимодействия «системы сложения» и «системы роста»	продукт эволюции «системы роста»
Доля занимаемого пространства композита, %	100	15-20	6-10

Маршрут магистральной трещины в подструктуре третьего типа

В общей теории строения вещества [12] под *атомно-молекулярным уровнем* строения подразумевается дискретная система взаимодействующих взаиморазмещённых в дальнем или ближнем порядке анионов и катионов размерностью $< 10^{-9}$ м. Создаваемые на основе атомно-молекулярных взаимодействий субстанции будут иметь те или иные различающиеся силовые характеристики, предопределяемые видом анионов и катионов. Какие? Ответы на вопросы этого рода дают фундаментальные научные дисциплины, относящиеся к области химического строения вещества, кристаллохимии, теории конденсации и кристаллизации, кристаллографии. В этом смысле строительное материаловедение в своих разработках может опираться на фундаментальные положения работ Г.Б. Бокия, Н.В. Белова, Х.С. Мамедова, которые раскрывают теоретические и практические возможности управления потенциалом механических и реологических характеристик кристаллохимических фаз и, в итоге, механических свойств макрообъёмных материалов.

Обращаясь к проблемам прочности строительных композитов (бетонов), в качестве наиболее наглядного примера можно привести структуру тоберморитоподобных высокоосновных и низкоосновных гидросиликатов кальция [13, 14], демонстрирующих сопротивление разрушению в диапазоне от десятков до сотен МПа. Уместен вопрос о том, как реализуется различный уровень прочности и в чём состоит природа разрушения данных объектов атомно-молекулярного и наномасштабного уровня? Есть ли принципиальное отличие проявления их механических свойств от субстанции с другим масштабным уровнем структуры?

Для ответа на эти вопросы необходимо обратиться к положениям так называемой термофлуктуационной теории прочности твёрдых тел.

Согласно термофлуктуационной теории С.Н. Журкова, равновесное положение ионов в ненагруженном состоянии не является статичным: для него характерны флуктуации – резкие колебания, сопровождающиеся разрывом межатомной связи и переходом иона в новое положение. Приложенная механическая нагрузка приводит не только к согласованному смещению ионов, но и при растяжении упорядочивает процесс термофлуктуационного разрыва, придаёт ему направленность, снижая энергетический порог разрыва и препятствуя рекомбинации разорванной связи. Суммарный, консолидированный разрыв связей сопровождается возникновением в системе сложения близкорасположенных ионов несплошности, которая может стать зародышем трещины в структуре более крупного масштабного уровня – уровня кристаллической решётки кристалла.

На основе теоретических посылок С.Н. Журковым предложена эмпирическая зависимость для оценки потенциала работоспособности, характеризуемого и раскрываемого критерием долговечности «по времени»

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/RT],$$

где τ_0 - период тепловых колебаний атомов ($10^{-12} \div 10^{-13}$ с); U_0 - энергия активации распада межатомных связей; γ - структурно-механическая константа, учитывающая концентрацию напряжений σ на разрываемой связи; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура тела.

Исходные идеи С.Н. Журкова получили основательное развитие в работах В.Р. Регеля, А.И. Слущкера, Э.Е. Томашевского и других [15], в результате чего сформировалась теория кинетической природы прочности твёрдых тел [16].

В последующем С.Б. Ратнер и В.П. Ярцев [17], используя заложенный в вышеприведенном соотношении принцип температурно-временной и силовой эквивалентности, связали величину прочности материала (предельного напряжения разрушения) с его атомно-молекулярными характеристиками специальным выражением

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[U_0 - \frac{2,3RT}{1-T/T_m} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right],$$

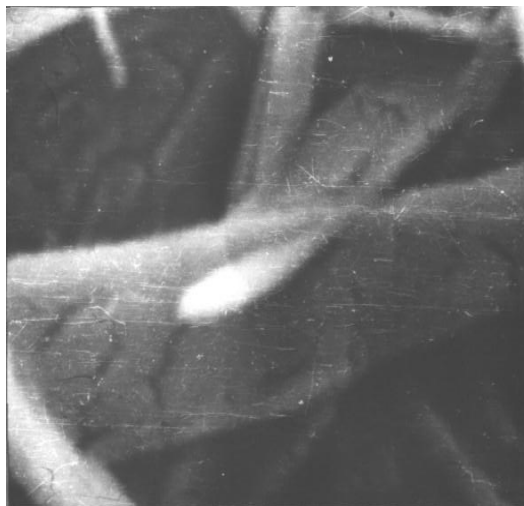
где T_m - предельная температура существования твердого тела, при которой все связи разрываются за одно колебание.

Этот шаг позволил «перевести» физические подходы на практический инженерно-технологический язык, когда учитываемые и рассматриваемые константы стало возможным принимать в качестве объекта конструирования и синтеза физической структуры материала на атомно-молекулярном его уровне. Особенно важно, что это позволило ставить вопрос об интеграции положений термофлуктуационной теории, отражающей физику разрушения, с подходами и положениями механики разрушения – механики трещин [9].

При переходе на **наномасштабный уровень** (уровень индивидуального кристалла) дискретная структура кристаллической решётки сменяется структурой сплошного монокристаллического тела - твёрдофазной субстанцией, обладающей признаками монофазности (при размерном масштабе структурного уровня $< 10^{-8}$ м).

Величина сопротивления трещинообразованию и прочность твёрдофазной субстанции кристалла предопределяется в первую очередь энергией решетки кристаллохимической разности, а также мерой её насыщения неоднородностями и дефектами: искажениями в виде вакансий, замещений, краевых и винтовых дислокаций; поверхностными трещинами (рисунок 1).

При эксплуатации композита величина силового воздействия на структуру третьего типа на несколько порядков может превосходить величину расчётного макроскопического напряжения в конструкции из композита. Диссипация, рассеяние поглощаемой композитом энергии силового нагружения по структурным связям монокристаллической субстанции (твёрдой фазе) сопровождается локализацией повышенных напряжений на контурах и вершинах её неоднородностей и дефектов с их (напряжений) дальнейшей концентрацией, кратность которой особенно велика в вершинах и по фронту зародышевых трещин. Именно в этих зонах действующие механические напряжения интенсифицируют процессы термофлуктуационного разрыва межатомных связей, придают им направленность, препятствуя рекомбинации, что сопровождается «страгиванием» зародышевой трещины и её развитием в форме последовательного отрыва соседних атомных плоскостей друг от друга в результате консолидированного разрыва связей по фронту трещины.



*Рисунок 1 - Твёрдофазная субстанция цементирующего вещества с контактами примыкания, срастания, прорастания
(увеличение до $\times 1,5 \cdot 10^5$; видны поверхностные дефекты в теле монокристаллов тоберморита)*

При отсутствии зародышевых трещин этому предшествует их образование в результате перемещения и слияния дислокаций.

Образовавшиеся берега зародышевой трещины выступают в качестве носителей поверхностной энергии, накопление которой сверх критических величин сопровождается появлением хрупкой (по Гриффитсу) микротрещины, движение которой подчиняется законам механики трещин.

Исходя из условий хрупкого разрушения по Гриффитсу, критическая величина напряжений σ_c при заданной полудлине трещины l равна

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}},$$

а критическая длина трещины l_c при заданном напряжении σ

$$l_c = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2},$$

где E – модуль упругости субстанции; γ – удельная поверхностная энергия субстанции.

Трещина распространяется в пределах характеристического размера атомно-молекулярного уровня, каковым является наименьший габаритный размер сечения индивидуального кристалла. Маршрут трещины соотносится с ориентацией межатомных плоскостей, межзеренными границами, границами блоков. При этом искажения кристаллической решётки могут выполнять двоякую роль: облегчать трещине продвижение за счёт разрыхления структуры, и, наоборот, задерживать трещину, становясь своего рода стопором. Эта роль предопределяется углом «встречи» трещины с дефектом.

Наиболее нагруженными оказываются участки, объёмы матричной субстанции, расположенные на границе ее раздела (контактных зонах) с включениями (концентраторами напряжений на «своих» структурных уровнях). Именно эти участки оказываются наиболее вероятными очагами трещинообразования.

Маршрут магистральной трещины в подструктуре второго типа

На *ультрамикромасштабном уровне* структуры (размерный диапазон $10^{-8} \dots 10^{-6}$ м) из однофазного состояния система переходит в многофазное (ТФ+ГФ+ЖФ). Индивидуальные кристаллы образуют аморфизированные области, кристаллические сростки, их ансамбли и кластеры, которые представляют собой пространственную конструкцию из индивидуальных морфологических разностей (скрытокристаллических, склонных к псевдопластическому, волокнисто-игольчатым, склонных к псевдовязкому, пластинчато-призматических, склонных к упругому деформированию), объединенных в единое целое контактами примыкания, срастания, прорастания. Кристаллические сростки, ансамбли, кластеры имеют развитое поровое пространство с порами разной формы и размера (рисунок 2, таблица 2).

А)

В)

С)

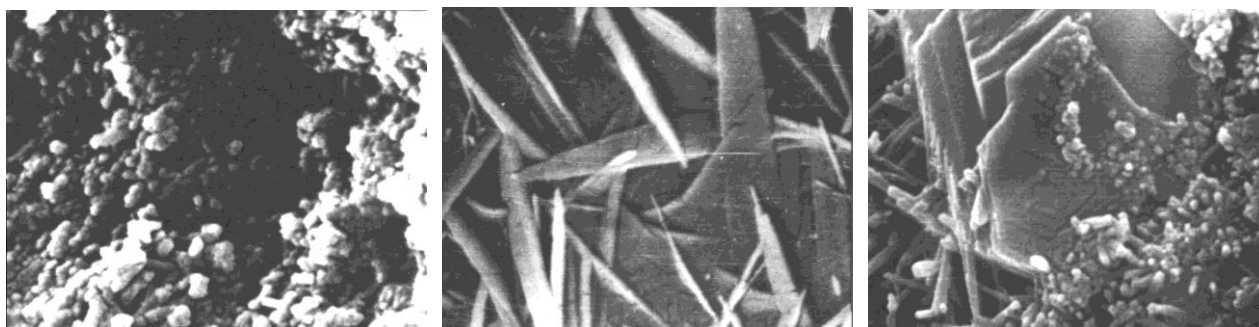


Рисунок 2 - Морфологические разности кристаллического сростка, $\times(1,2 \div 1,5) \cdot 10^5$:

А – скрытокристаллическая; В – волокнисто-игольчатая; С – пластинчато-призматическая

Таблица 2 - Характеристика морфологических разностей кристаллического сростка ультрамикромасштабного уровня структуры композита

Показатели для морфологической разности	А	В	С
Размеры в поперечине, нм	100...130	100...500	800...1300
Тип контакта	примыкания, срастания	примыкания, срастания, прорастания	примыкания, срастания, прорастания
Число контактов в единице объема, см ⁻³	$\approx 10^7$	$\approx 10^5$	$\approx 10^4$
Удельная площадь поверхности, м ² /г	500	100...200	30...50
Эквивалентный радиус пор, нм	5...7	20...40	40...80

Несмотря на ярко выраженную стохастичность таких образований, они могут быть уподоблены строительным макромасштабным конструкциям (стержневым, стоечно-балочным, оболочечным и т.п.). Есть основания полагать, что между их свойствами существует сходство [18]. Такое сходство предполагает возможность использования аналитического аппарата теории строительной механики и расчёта строительных конструкций [19, 20] для рассмотрения задач количественной оценки напряжённо-деформированного состояния и потенциала сопротивления разрушению микроконструкций второго типа подструктуры.

На ультрамикромасштабном уровне маршрут трещины будет пролегать по зонам контактирования индивидуальных кристаллов в сростке, так как, во-первых, они являются местом локализации и концентрации напряжений, а во-вторых, характеризуются повышенной дефектностью как следствия: разориентации кристаллической решетки в контактной зоне родственных по составу кристаллов; несоответствия параметров решеток разных по составу кристаллов, контактирующих в сростке; физических нарушений сплошности.

Соответственно, сопротивление разрушению данного масштабного уровня в композите и композита в целом будет предопределяться количеством контактов и их «качеством».

Следует и можно считать, что представленное рассмотрение имеет отношение также к формированию и развитию повреждений на *субмикромасштабном уровне* ($10^{-6}...10^{-4}$ м) - уровне цементирующего вещества в структуре строительного композита, поскольку данный уровень также является многофазным (ТФ+ГФ+ЖФ). В нём в качестве элементов порового пространства как включений дополнительно идентифицируются капиллярные поры, внутриансамблевые и междусростковые поры, контракционные поры.

Маршрут магистральной трещины в подструктуре первого типа

Субмикромасштабный структурный уровень цементирующего вещества в сочетании с остаточными зёрнами цемента, а также специально вводимыми зёрнами микронаполнителя образуют структуру *микромасштабного уровня* в размерном диапазоне $10^{-4}...10^{-3}$ м (цементный камень, или так называемый микробетон Юнга). Введением в цементный камень (матрицу) зёрен мелкого заполнителя (включения) формируют *мезомасштабный уровень* структуры, который является конгломератным композитом типа «твёрдофазная матрица – твёрдофазные зернистые включения» ($10^{-2}...10^{-1}$ м). Введением в цементно-песчаный камень (матрицу) зёрен крупного заполнителя (включений) формируется *макроструктура* бетона ($10^{-1}...10^0$ м), также представляющая собой конгломератный композит типа «твёрдофазная матрица – твёрдофазные зернистые включения» (рисунок 3).

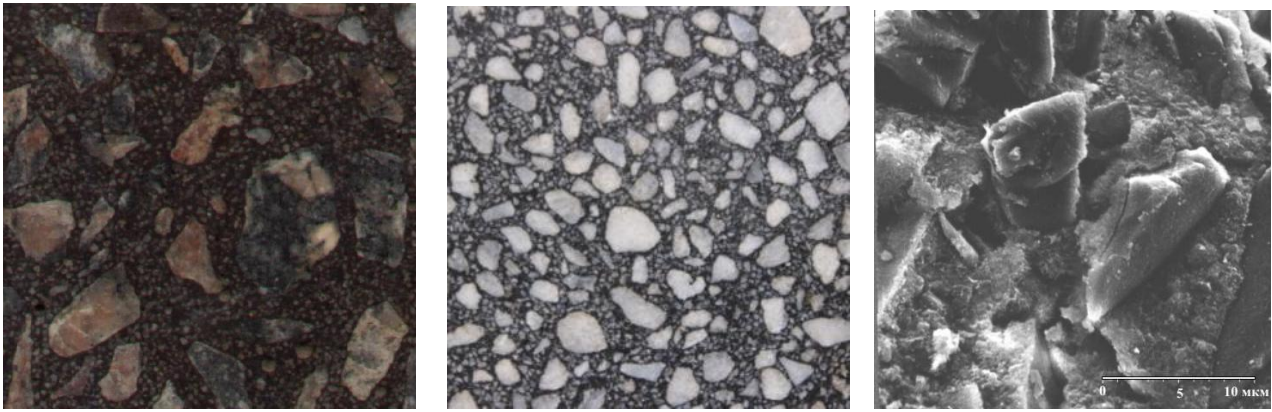


Рисунок 3 - Примеры макро-, мезо- и микромасштабного уровня структуры первого типа в конгломератном строительном композите
(макро- и мезоуровни даны без увеличения, микроуровень - с увеличением $\times 3000$)

Параметры микро-, мезо- и макромасштабных уровней структуры представлены в таблице 3, характеристика субстанции уровней – в таблице 4.

Таблица 3 - Идентификационные признаки микро-, мезо- и макромасштабных уровней структуры конгломератных строительных композитов

Параметр структуры	Значение параметра (оценочно), на уровне		
	микро	мезо	макро
Характеристический размер, м	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	$\geq 3 \cdot 10^{-2}$
Размер включений, м	$(1 \div 20) \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$	$(5 \div 40) \cdot 10^{-3}$
Удельная площадь поверхности включений, $\text{м}^2/\text{кг}$	до 300	до 24	до 0,5
Удельная поверхностная энергии включений, $\text{Дж}/\text{кг}$	до 400	до 30	до 0,6
Число частиц в единице объема, шт./ м^3	до $1 \cdot 10^{12}$	до $5 \cdot 10^6$	до $1 \cdot 10^4$
Крупность дефектов, м	$(4 \div 40) \cdot 10^{-5}$	$(4 \div 9) \cdot 10^{-4}$	$(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$

Привязка маршрута трещины на рассмотренных уровнях исходит из того, что они являются пространственно-геометрическими аналогами и отвечают строению конгломератных композитов, состоящих из матрицы, включения и образуемого ими контакта. В связи с этим, качественная картина диссипации, локализации и концентрации напряжений, трещинообразования будет отвечать общим для них и единым закономерностям: формирование полей напряжений и маршрутов трещин на макро-, мезо- и микроуровнях будет геометрически подобным. Например, в крупнозернистой системе бетона (макроуровень) процесс разрушения будет включать псевдопластическое предразрушения и разрушение его матрицы, представленной мелкозернистой системой (мезоуровень). Продвижение фронта трещины в бетоне будет проходить через матричную субстанцию (в данном примере через мелкозернистую систему), через контактную зону матрицы и крупного заполнителя, не исключая вариант пересечения трещиной и частиц крупного заполнителя при определенном энергетическом балансе напряжений в структуре.

Таблица 4 - Характеристика субстанции микро-, мезо- и макромасштабных уровней структуры конгломератных строительных композитов

Показатель свойства	Значения показателя на уровне		
	микро	мезо	макро
Модуль упругости, $\text{МПа} \times 10^{-3}$	До 60	48-52	30 - 40
Коэффициент Пуассона	0,22-0,29	0,14-0,15	0,18 – 0,21
Предельная растяжимость, мм/м	До 10	0,7-0,8	1,1 – 1,3
Предел прочности при сжатии, МПа	200-600	120-130	30 - 60
Вязкость разрушения, $\text{МН}/\text{м}^{3/2}$	Более 2,5	0,7-0,8	0,85 – 1,1
Удельная энергия разрушения, $\text{Дж}/\text{м}^2$	Более 9000	280	75 - 105

На рисунке 4 а представлена фрактограмма, типичная для варианта маршрута трещины, в котором поверхность разрушения располагается в матрице и на границах контакта крупного заполнителя с матрицей (бетон рядового качества). На рисунке 4 б дается фрактограмма, когда поверхность разрушения в маршруте трещины пересекает частицы крупного заполнителя (бетона класса НРС).



Рисунок 4 - Характерные фрактограммы тяжелого бетона:

а) трещина обходит зерна крупного заполнителя; б) трещина пересекает зерна крупного заполнителя [21]

Картина процесса разрушения, маршрут трещины и в мелкозернистой системе, и в микрозернистой в качественной интерпретации будет аналогичной маршруту трещины на макроуровне. В количественной интерпретации параметров процесса разрушения будет иметь место отличие по энергетическим характеристикам трещинообразования (см. таблицу 4).

Для всех уровней первого типа подструктуры рассмотрение задач формирования маршрута трещины лежит в контексте моделей механики деформируемого твёрдого тела, механики разрушения бетона, отражающих влияние вида, размера и формы, состава включений в матрицу, их пространственной ориентации и равномерности размещения в объёме композита [22-26].

О критериях конструирования и синтеза подструктур конгломератных строительных композитов. Согласованное применение положений физики разрушения и механики разрушения структуры композитов позволяет охарактеризовать процесс деградации структуры в диапазоне от начальных актов разрыва единичных атомно-молекулярных связей до макроскопического повреждения тела конструкции. С учетом «включенных» в целостную структуру конгломератного полиструктурного композита подструктур, при разрушении трещина должна «пройти» последовательно монофазное твердое тело, затем - пространственную конструкцию из отдельных строительных элементов и их сочленений, и после этого – условно сплошное гетерогенное тело (среду). На последнем этапе трещина может проходить только по матрице, по матрице и контактной зоне, по матрице и включениям.

В теории конструирования и синтеза структур целевой установкой и критерием их оптимизации принимается эффективность использования потенциала структурных связей композита в сопротивлении воздействию факторов эксплуатационной среды, в которой работают строительные конструкции. Это означает, что полиструктура композита должна обеспечивать максимальную энергоёмкость процесса прохождения трещины по своему маршруту. Оптимизация структуры осуществляется через регулирование ее параметров в задаваемых условиях нагружения. Результатом оптимизации являются «конструкторские»

решения по повышению однородности поля напряжений и снижению величины концентрации напряжений, сокращению мест зарождения повреждений, позитивному изменению траектории движения, длины фронта магистральной трещины, и, соответственно, затратам энергии разрушения [9].

Для решения обозначенных задач конструирование подструктур первого типа должно быть связано с оптимизацией критерия объёмного соотношения компонентов (матрицы и включений), которое определяет величины межзернового зазора и, соответственно, характеристики цементации композитной структуры, которая может отвечать контактовому, плёночному, поровому, базальному видам. Предметом и целью конструирования подструктуры первого типа является при этом обоснование гранулометрии зернистых включений, определяющих плотность упаковки, координационное число упаковки, удельное число контактов в единичном геометрическом объёме композитной макро-, мезо- и микроструктуры и сформированной в ней системы сложения крупно-, мелко- и микрозернистых включений. Неотъемлемым вопросом конструирования композитной структуры этих масштабных уровней выступают параметры порового пространства.

Масштабная полиструктурность конгломератного строительного композита выражается в том, что относительно более крупный масштаб содержит в качестве матричного материала следующую по масштабу структуру. Поэтому в оптимизационных задачах конструирования композита возникает вопрос обеспечения квазиоднородности полиструктуры на основе геометрической соразмерности, конгруэнтности структурных элементов.

Критериями конструирования и синтеза второго и третьего типов структуры выступают характеристики твёрдой фазы, определяющие количественные и качественные показатели системы физико-химических структурных связей. Особо отметим, что направленное конструирование подструктур третьего типа по комплексу задаваемых свойств в целостной полиструктуре строительного композита стало возможным с появлением и привлечением методов компьютерного моделирования [27]. К сожалению, этого нельзя сказать о подструктурах второго типа, которые в настоящее время не поддаются детерминации и моделированию.

Заключение

Представленные результаты могут стать опорой для разработки принципов получения структурированной системы конгломератного строительного композита, обеспечивающих возможности управления формированием его напряжённо-деформированного состояния в строительной конструкции и достижения требуемой прочности и трещиностойкости при минимизации производственных затрат.

Благодарности

Статья посвящена памяти моего Учителя - академика РААСН, д.т.н., профессора Евгения Михайловича Чернышова (1936-2021), под руководством которого и были разработаны ее основные положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.Т. Условия реализации возможных режимов развития процесса разрушения твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2020. № 2. С. 28-39. doi:10.31857/S0572329920010055
2. Dong W., Wu Z., Zhou X. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 49. Pp. 352-363. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041
3. Дамаскинская Е.Е., Фролов Д.И., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р. Идентификация критического состояния деформированных горных пород // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 1(34). С. 116-123. doi:10.5281/zenodo.1196713

4. Колчунов В.И., Кузнецова К.Ю., Федоров С.С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плоскотянутых конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // Строительство и реконструкция. 2021. № 3(95). С. 15-26. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26
5. Леденев В.В., Однолюбо В.Г., Нгуен З.Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 312 с.
6. Miura T., Sato K., Nakamura H. The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC // Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 114. Pp. 103768. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103768.
7. Трещев А.А., Захарова И.А., Судакова И.А. О вариантах выбора диаграмм деформирования композитных материалов и не только // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2(17). С. 81-90. doi:10.51608/26867818_2022_2_81
8. Чернышов Е.М. Макеев А.И. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 3. Системная идентификация "конструкции структуры" конгломератных строительных композитов (в качественной постановке проблемы) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 3(747). С. 5-26.
9. Чернышов Е.М., Макеев А.И., Коротких Д.Н. Базовые положения механики проявления конструктивных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 1. Обзор результатов теоретических исследований проблемы конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Известия вузов. Строительство. 2020. № 8. С. 43-51
10. Соколова Ю.А., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. и др. Расчетно-экспериментальные исследования внутренних напряжений в строительных материалах // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4(7). С. 60-65. doi:10.24411/2686-7818-2020-10037.
11. Селяев В.П., Селяев П.В., Лазарев А.Л. и др. Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4(53). С. 31-40. doi:10.54734/20722958_2022_4_31.
12. Карапетянц М.Х. Строение вещества. М.: Либроком, 2014. 312 с.
13. Илюхин В.В., Кузнецов В.А., Лобачёв А.Н., Бакшутев В.С. Гидросиликаты кальция. Синтез монокристаллов и кристаллохимия. М.: Наука. 1979. 184 с.
14. Kulik D. A., Miron G. D., Lothenbach B. A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. Pp. 106585. doi:10.1016/j.cemconres.2021.106585.
15. Shkolnik I.E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength // Cement and Concrete Composites, 2005. V. 27. I. 7-8. Pp. 747-757.
16. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 535 с.
17. Ярцев В.П., Киселева О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009. 124 с.
18. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Типы подструктур в целостной полиструктуре бетона и закономерности формирования параметров поля напряжений в композите (к развитию теории конструирования и синтеза структур конгломератных строительных композитов) // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Том 2. М: Изд-во АСВ, 2021. С. 304-314.
19. Вычислительные методы в механике разрушения / Под. ред. С. Алгури. М.: Мир, 1990. 392 с.
20. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 2. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО / Под общ. ред. А.М. Белостоцкого и П.А. Акимова. М.: Изд-во АСВ, 2016. 596 с.
21. Коротких Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии). Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. 141 с.
22. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
23. Селяев В.П., Селяев П.В. Физико- химические основы механики разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 220 с.
24. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Структура и прочность конструктивных цементных композитов. Саранск, 2015. 360 с.
25. Tran N.T., Park J.K., Kim D.J. [et al.] Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 79. Pp. 169-184. doi:10.1016/j.cemconres.2015.09.011
26. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н., Макеев А.И. Базовые положения механики проявления конструктивных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 2. Обзор результатов прикладных

исследований по проблеме конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Известия вузов. Строительство, 2020. № 9. С. 48-57

27. Valavi M., Casar Z., Bowen P. [et al.] Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF // Cement and Concrete Research, 2022. Vol. 154. Pp. 106712. doi:10.1016/j.cemconres.2022.106712.

REFERENCES

1. Belikov V.T. Usloviya realizatsii vozmozhnykh rezhimov razvitiya protsessa razrusheniya tverdogo tela [Conditions for the implementation of possible modes of development of the process of destruction of a solid body]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela. 2020. No. 2. Pp. 28-39. doi:10.31857/S0572329920010055
2. Dong W., Wu Z., Zhou X. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 49. Pp. 352-363. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041
3. Damaskinskaya E.E., Frolov D.I., Panteleev I.A., Gafurova D.R. Identifikatsiya kriticheskogo sostoyaniya deformirovannykh gornyx porod [Identification of the critical state of deformed rocks]. Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2018. No. 1(34). Pp. 116-123. doi:10.5281/zenodo.1196713
4. Kolchunov V.I., Kuznetsova K.Yu., Fedorov S.S. Model' kriteriya treshchinostoykosti i prochnosti plosknapryazhennykh konstruktivnykh iz vysokoprochnogo fibrobetona i fibrozhelezobetona [Model of crack resistance and strength criterion for plane stressed structures made of high-strength fiber-reinforced concrete and fiber-reinforced concrete]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. No. 3(95). Pp. 15-26. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26
5. Ledenev V.V., Odnolko V.G., Nguyen Z.Kh. Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya [Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics]. Tambov: Publishing House of FGBOU VPO "TSTU", 2013. 312 p.
6. Miura T., Sato K., Nakamura H. The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC. // Cement and Concrete Composites, 2020. Vol. 114. Pp. 103768. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103768
7. Treschev A.A., Zakharova I.A., Sudakova I.A. O variantakh vybora diagramm deformirovaniya kompozitnykh materialov i ne tol'ko [On options for choosing deformation diagrams for composite materials and not only]. Ekspert: teoriya i praktika. 2022. No. 2(17). Pp. 81-90. doi:10.51608/26867818_2022_2_81
8. Chernyshov E.M., Makeev A.I., Korotkikh D.N. Bazovyye polozheniya mekhaniki proyavleniya konstruktivnykh svoystv konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov. Chast' 1. Obzor rezul'tatov teoreticheskikh issledovaniy problemy konstruirovaniya i sinteza struktur sovremennykh vysokotekhnologichnykh betonov [Basic provisions of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. Part 1. Review of the results of theoretical studies of the problem of designing and synthesizing the structures of modern high-tech concretes]. Izvestiya vuzov. Construction. 2020. No. 8. Pp. 43-51 (rus)
9. Chernyshov E.M. Makeev A.I. Materialovedeniye i tekhnologiya stroitel'nykh kompozitov kak sistema nauchnogo znaniya i predmet razvitiya issledovaniy. Chast' 3. Sistemnaya identifikatsiya "konstruktsii struktury" konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov (v kachestvennoy postanovke problemy) [Material science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and subject of research development. Part 3. System identification of the "structural structure" of conglomerate building composites (in a qualitative formulation of the problem)] // Izvestia of higher educational institutions. Construction. 2021. No. 3(747). Pp. 5-26. (rus)
10. Sokolova Yu.A., Kondrashchenko V.I., Kesariysky A.G. et al. Raschetno-eksperimental'nyye issledovaniya vnutrennikh napryazheniy v stroitel'nykh materialakh [Calculation and experimental studies of internal stresses in building materials]. Ekspert: teoriya i praktika, 2020. No. 4(7). Pp. 60-65. doi:10.24411/2686-7818-2020-10037
11. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Lazarev A.L. et al. Fraktal'naya kvantovo-mekhanicheskaya model' deformirovaniya i razrusheniya betona [Fractal quantum-mechanical model of deformation and destruction of concrete]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2022. No. 4(53). Pp. 31-40. doi:10.54734/20722958_2022_4_31
12. Karapetyants M.Kh. Stroyeniye veshchestva [The structure of matter]. M.: Librokom, 2014. 312 p. (rus)
13. Ilyukhin V.V., Kuznetsov V.A., Lobachev A.N., Bakshutov V.S. Gidrosilikaty kal'tsiya. Sintez monokristallov i kristallokhimiya [Calcium hydrosilicates. Synthesis of single crystals and crystal chemistry]. M.: Science. 1979. 184 p. (rus)
14. Kulik D.A., Miron G.D., Lothenbach B. A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. Pp. 106585. doi:10.1016/j.cemconres.2021.106585
15. Shkolnik I.E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength. Cement and Concrete Composites, 2005. V. 27. I. 7-8. Pp. 747-757.
16. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel [Kinetic nature of the strength of solids]. M.: Nauka, 1974. 535 p. (rus)

17. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Prognozirovaniye povedeniya stroitel'nykh materialov pri neblagopriyatnykh usloviyakh ekspluatatsii [Predicting the behavior of building materials under adverse operating conditions]. Tambov: Publishing House of the Tambov State Technical University, 2009. 124 p.
18. Chernyshov E. M., Makeev A. I. Tipy podstruktur v tselostnoy polistrukture betona i zakonomernosti formirovaniya parametrov polya napryazheniy v kompozite (k razvitiyu teorii konstruirovaniya i sinteza struktur konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov) [Types of substructures in the integral polystructure of concrete and patterns of formation of stress field parameters in the composite (to the development of the theory of design and synthesis of structures of conglomerate building composites)] // Fundamental, search and applied research of RAASN on scientific ensuring the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection of scientific papers of the RAACS: in 2 volumes / Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAASN). Volume 2. M: DIA Publishing House, 2021. Pp. 304-314. (rus)
19. Vychislitel'nyye metody v mekhanike razrusheniya [Computational methods in fracture mechanics] / Pod. ed. S. Alturi. M.: Mir, 1990. 392 p. (rus)
20. Aktual'nyye problemy chislennogo modelirovaniya zdaniy, sooruzheniy i kompleksov. Tom 2. K 25-letiyu Nauchno-issledovatel'skogo tsentra StaDiO [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes. Volume 2. To the 25th anniversary of the StaDiO Research Center] / Under the general ed. A.M. Belostotsky and P.A. Akimov. M.: Izd-vo ASV, 2016. 596 p. (rus)
21. Korotkikh D.N. Treshchinostoykost' sovremennykh tsementnykh betonov (problemy materialovedeniya i tekhnologii) [Crack resistance of modern cement concretes (problems of materials science and technology)]. Voronezh: Voronezh GASU, 2014. 141 p. (rus)
22. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki betona [General models of concrete mechanics]. M.: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus)
23. Selyaev V.P., Selyaev P.V. Fiziko- khimicheskiye osnovy mekhaniki razrusheniya tsementnykh kompozitov [Physico-chemical foundations of fracture mechanics of cement composites]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2018. 220 p. (rus)
24. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. Struktura i prochnost' konstruktsionnykh tsementnykh kompozitov [Structure and strength of structural cement composites]. Saransk, 2015. 360 p.
25. Tran N.T., Park J.K., Kim D.J. [et al.] Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. Cement and Concrete Research, 2016. Vol. 79. Pp. 169-184. doi:10.1016/j.cemconres.2015.09.011
26. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N., Makeev A.I. Bazovyye polozheniya mekhaniki proyavleniya konstruktsionnykh svoystv konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov. Chast' 2. Obzor rezul'tatov prikladnykh issledovaniy po probleme konstruirovaniya i sinteza struktur sovremennykh vysokotekhnologichnykh betonov [Basic provisions of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. Part 2. Review of the results of applied research on the problem of designing and synthesizing the structures of modern high-tech concretes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2020. No. 9. Pp. 48-57.
27. Valavi M., Casar Z., Bowen P. [et al.] Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF. Cement and Concrete Research, 2022. Vol. 154. Pp. 106712. doi:10.1016/j.cemconres.2022.106712

Информация об авторе:

Макеев Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций.

E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru

Information about author:

Makeev Alexey Iv.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,

candidate of sciences, associate professor, associate professor of the department of Technology of Building Materials, Products and Structures.

E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru