

УДК 666: 519.8

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУР МАТЕРИАЛА И ИЗДЕЛИЯ

Канд. техн. наук О. А. Коробко (ОГАСА)

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУР ВИРОБУ ТА МАТЕРІАЛУ

Канд. техн. наук О. О. Коробко (ОДАБА)

INTERRELATION OF STRUCTURES OF PRODUCT AND MATERIAL

Phd. tehn. sciences O. A. Korobko

В статье строительные изделия рассматриваются в виде открытой самоорганизующейся системы. Такое представление предполагает взаимосвязь организации структур изделия и материала как его равноправной полиструктурной составляющей. Раскрываются возможности для выявления факторов управления созданием заданного набора различных по назначению элементов структуры материала, обеспечивающих проявление и сохранение свойств на уровне структуры изделия при эксплуатации.

Ключевые слова: изделие, материал, система, структурная организация, уровни неоднородностей, взаимообусловленность, активные элементы.

У статті будівельні вироби розглядаються у вигляді відкритої системи, що самоорганізується. Таке уявлення передбачає взаємозв'язок організації структур виробу і матеріалу як його рівноправної поліструктурної складової. Розкриваються можливості для виявлення факторів керування одержанням заданого набору різних за призначенням елементів структури матеріалу, які забезпечують прояв та збереження властивостей на рівні структури виробу при експлуатації.

Ключові слова: виріб, матеріал, система, структурна організація, рівні неоднорідностей, взаємообумовленість, активні елементи.

In the article building products are explored as the open self-organized system. Such representation allows revealing interrelation between organization of the structure of product and the structure of material. The material is considered as hierarchy of autonomous conditional levels of structural heterogeneities. Formation of integrated structure of the product-system is a result of initiation structural changes by levels. It promotes emergence of various structures at levels of heterogeneities. The interrelation of levels is provided by self-development of networks of technological cracks and inner surfaces of partition. Interaction of active elements allows to be shown to properties at the level of a product and to effects of adaptation of material to influence of external factors. Formation of the ordered set structural elements will promote increase resistance of a product under operating conditions. It is possible to operate the structural organization of material and a product due to change of macrostructure parameters.

Keywords: *product, material, structure, system, structural organization, at levels of heterogeneities, interference, active elements.*

Введение. В строительном материальном поведении все большее значение приобретает структурный подход как основа для разработки методов познания, описания и получения строительных изделий с заданным набором структурных элементов на уровне материала [1, 2]. Раскрываются возможности создания структурных форм, обеспечивающих проектные показатели качества изделий и их поддержку при изменении условий эксплуатации. Изменение свойств изделий под действием внешних факторов причинно связано со структурными изменениями материала, из которого они изготовлены. Материал проявляет себя как конечный продукт только в изделиях. Взаимообусловленность функциональности изделия и материала рационально обосновать, исходя из представления изделия как объекта-системы. Такой подход позволяет оценить вклад структуры материала в структурное оформление изделия, выявить элементы структуры, отвечающие за обеспечение и сохранение уровня свойств, представить структуру как функцию движения, определяющую через изменение своих параметров безопасность работы изделия в различных эксплуатационных ситуациях.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее время актуальной становится концепция, предполагающая доминирование структуры

в реализации поведения материала изделий. Структурный подход позволяет устанавливать границы масштабного описания объектов-систем в зависимости от поставленной цели [3]. Обязывает учитывать полиструктурность материалов [4] и влияние многоуровневости структуры на их свойства [5, 6], включая сетевые взаимосвязи и взаимообусловленность взаимодействий составных частей при самоорганизации разномасштабных структур [1, 7], многоочаговость зарождения новых образований в результате синхронного протекания в одном материале разноплановых процессов структурообразования [8-10]. Особое внимание уделяется активной роли технологических трещин и внутренних поверхностей раздела в эволюции структуры материалов и изделий [9, 11], структурообразующей и разрушающей функции деформаций при получении и эксплуатации строительных композитов [12, 13], адаптации сложноорганизованных, капиллярно-пористых, абиотических и других систем к внешним воздействиям [14, 15]. Таким образом, исследования, посвященные объяснению принципов построения структуры строительных изделий с учетом вклада структуры материала, можно считать своевременными и актуальными.

Определение цели и задачи исследований. Цель исследований – проанализировать роль взаимообусловленности структурной организации в получении

заданного набора разноуровневых и различных по назначению элементов структуры бетона, специфицирующих структуру изделия. Это позволит обеспечить проявление нормативных показателей свойств на уровне изделия и их сохранение в условиях эксплуатации за счет проявления эффектов адаптации на уровне материала. Для этого необходимо решить задачи декомпозиции изделия как системы определенного вида с выделением бетона в качестве его подсистемы, выявить управляющие факторы взаимосвязанного создания отдельных подструктур и оценить структурные изменения материала изделия-системы при малоцикловой усталости.

Основная часть исследований.

Строительное изделие рассматривается как открытая самоорганизующаяся система, в которой изделие и бетон проявляют себя в качестве равноправных элементов [1, 3]. Это позволяет представить изделие в виде специально оформленного материала конкретной геометрической формы, поэтому свойства изделия и материала неразделимо связаны онтологической сущностью. Изделие-система априорно является структурно организованным объектом. Параметры структуры бетона автоматически становятся параметрами структуры изделия. Бетон, как практически любой материал строительных изделий, является полиструктурным. По качественному несходству механизмов структурообразования можно выделить отдельные уровни неоднородностей структуры бетона как определенные системы, которые в то же время являются подсистемами бетона-системы. В соответствии с этим предполагается, что в структуре бетона сосуществуют неоднородности на уровнях частиц вяжущего (микроструктура), продуктов новообразований (наноструктура), заполнителей и матричной составляющей (макроструктура) и на уровне изделия. Каждый уровень включает набор характерных для него структурных элементов и участвует как составная часть

во взаимно обусловленной организации структуры бетона и структуры изделия.

На уровне частиц вяжущего (или связующего) неоднородность структуры может быть представлена в виде системы, способной к аутопоэзису [7] как самопроизводства и самопостроения собственных структурных составляющих. Индивидуальное сочетание частиц вяжущего в образованных ими кластерных структурах определяет неповторимость условий гидратации в любом выделенном объеме микроструктуры. При появлении продуктов новой фазы часть ионов объединяется в зародыши кристаллических сростков с дальнейшим ростом кристаллов, часть ионов формирует гелевидную составляющую цементного камня, которая включает от 60 до 80 % от общего количества новообразований [16]. Это ведет к созданию новой неоднородности структуры бетона, самоорганизованной агрегатами из частиц нанометрического размера. Наночуровень в качестве подсистемы входит в состав микроструктуры, являющейся подсистемой макроструктуры. Анализ показал, что даже при одном и том же составе бетона на макроуровне сосуществуют ячейки, отличающиеся размером, типом укладки заполнителей и соотношением адгезионно-когезионных сил связи между матричной фазой и заполнителями. Формирование макроструктуры происходит одновременно во всех ячейках, но ее реализация уникальна для каждой отдельной ячейки.

Процессы и явления спонтанной самоорганизации бетона на всех уровнях неоднородностей приводят к зарождению и развитию трещин и внутренних поверхностей раздела (ВПП) [1, 9, 11]. Многоуровневость структуры обуславливает сосуществование трещин и ВПП в виде сети-паутины, образованной как «сети внутри сетей». Каждая сеть в иерархии интегральной сети представляет собой ансамбль определенных элементов на определенном структурном уровне.

Разноуровневые сети проявляют себя и взаимодействуют через внутри- и межструктурные связи.

Развитая сеть трещин и ВПР связывает все уровни структуры бетона и изделия в единую диссипативную систему, организация которой как многоуровневого набора относительно автономных подструктур происходит в результате их взаимовлияния. Взаимообусловленность уровней проявляется во взаимном инициировании структурных перестроек, что обратным порядком отражается на их собственной структуре как источников возмущения. Это позволяет предположить возможность использования параметров структурных уровней как факторов управления, посредством которых можно направленно создавать структуры с требуемыми параметрами составляющих для работы материала изделия в конкретных условиях эксплуатации.

Основной причиной снижения стойкости бетона как материала строительных изделий, включая конструкции сооружений железнодорожного транспорта, считают малоцикловую усталость. Периодическое изменение температурно-влажностных градиентов воспринимает бетон, в котором возникают деформации, связанные с изменением массы и объема. Происходят необратимые структурные перестройки, что является причиной изменения свойств материала. Благоприятные преобразования структуры способствуют ее самосохранению за счет реализации эффектов адаптации, возможность проявления которых в первую очередь связана с присутствием в бетоне трещин и ВПР. Это предопределяется тем, что внутренние поверхности раздела и трещины способны изменять собственные параметры в одном темпоритме с воздействиями [1]. Сосуществование этих элементов в виде сети позволяет обеспечить своевременное перераспределение деформаций. Таким образом, для повышения стойкости бетона необходимо обеспечить определенный

сетевой набор трещин и ВПР, который будет гарантировать адекватность проявления реакций структуры материала на всех уровнях неоднородностей. Следует ожидать, что увеличение многовариантности параметров макроструктуры должно привести к усилению разнообразия характеристик активных элементов на уровне всего материала, условно разделенного на структурные ячейки. Этим будут создаваться предпосылки для сохранения структурой нормативных показателей свойств бетона на протяжении проектного срока службы изделия.

Все сделанные теоретические предположения получили практическое подтверждение.

Для определения свойств материала в ячейках были изготовлены модели на основе портландцемента одного состава с имитаторами заполнителей в виде призм, которые располагали таким образом, чтобы получить ячейки кубической и гексагональной формы при различном ориентировании в них заполнителей. Изменение состояния поверхности заполнителей осуществляли путем аппретирования веществом с пониженной адгезией к цементной составляющей. Это обеспечило различные соотношения сил связи на границах раздела между матричным материалом и заполнителями: $R_A > R_K$; $R_A < R_K$; $R_A = R_K$, где R_A – величина адгезии матричного материала к поверхности заполнителя, R_K – величина когезионной прочности матричного материала.

Проведенные исследования подтвердили индивидуальность проявления свойств матричной составляющей в структурных ячейках с различными параметрами. В условиях эксперимента величина объемных деформаций твердеющего матричного материала при разных способах укладки заполнителей изменялась до 27 %, при модификации их поверхности – до 44 %. Изменение сроков схватывания составило в среднем 1,5-2 ч в

зависимости от формы и свойств ячеек. В различных зонах одной и той же структурной ячейки периоды формирования отличались до 30-45 мин.

Поврежденность матричного материала начальными дефектами оценивали через коэффициент поврежденности [1]: $K_{п} = \sum L / S$, где $\sum L$ –

общая протяженность трещин и внутренних поверхностей раздела в выделенной зоне структурной ячейки, см; S – площадь выделенной зоны, $см^2$. В зависимости от расположения и типа укладки заполнителей значения $K_{п}$ могут изменяться до 2-2,5 раз, при различном состоянии поверхности – до 40 % (рис. 1).

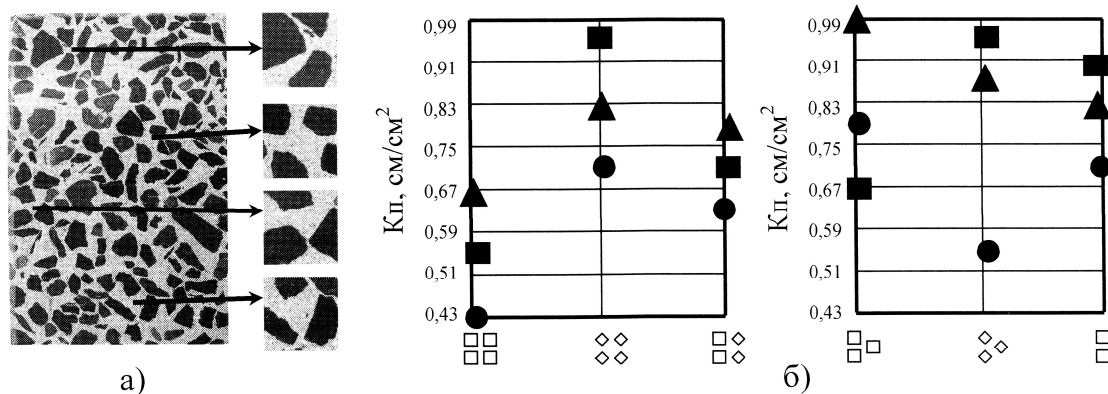


Рис. 1. Разнообразие геометрических параметров структурных ячеек бетона промышленного состава (а) и их влияние на значения коэффициента технологической поврежденности $K_{п}$ (б):
прямоугольники – $R_A < R_K$; кружки – $R_A > R_K$; треугольники – $R_A = R_K$

Суммарное количество трещин и ВПР определяет общую гетерогенность материала и, следовательно, его способность в форме изделия противостоять разрушающим нагрузкам. При этом, несмотря на индивидуальность свойств структурных ячеек, в изделии они проявляют себя как взаимосвязанные части одной целостности. Изменение значений прочности при сжатии моделей при изменении характеристик макроструктуры составило 27-48 %. Увеличение сложности структурного оформления путем неупорядоченного расположения заполнителей способствовало повышению показателей прочности до 40 % по сравнению с моделями, в которых заполнители располагались симметрично. Развитие магистральной трещины

проходило по дефектам, образовавшимся в период структурообразования матричной составляющей.

Развитие трещин в материалах с блочной структурой можно представить как дискретно-непрерывный процесс, что связано цикличностью воздействий и поэтапным подрастанием отдельно всех трещин [9]. Как следствие, происходит изменение интегральной поврежденности материала изделия. Было определено, что различие значений $K_{п}$ матричной составляющей моделей одинарных ячеек в зависимости от их параметров после циклов попеременного увлажнения и высушивания составило от 10 до 57 %. Влияние разнообразия структуры на изменение поврежденности сохранялось при каждом цикле воздействий (рис. 2).

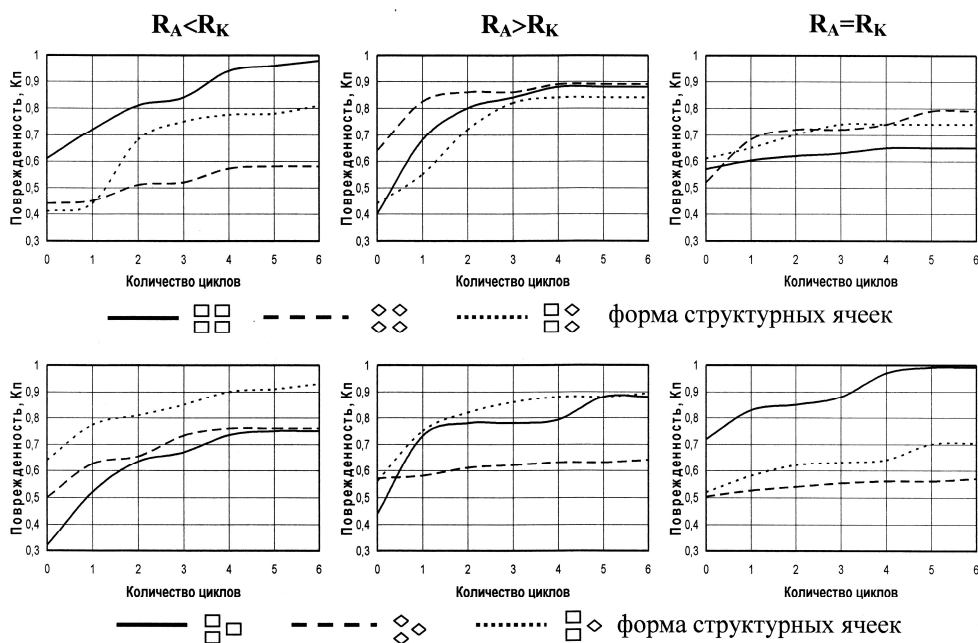


Рис. 2. Изменение интегральной поврежденности (K_p , $\text{см}/\text{см}^2$) бетона с различными параметрами макроструктуры при многократном увлажнении и высушивании

Изделия из бетонов промышленных составов включают разнообразный набор макроструктурных параметров, что способствует перераспределению реакций структуры материала и повышению ее стабильности на макроуровне. Это было подтверждено при проведении экспериментов с использованием составов бетона на гранитном щебне. Анализировали три характерных случая формирования сил связи между матричной составляющей и поверхностью заполнителей: $R_A > R_K$ – на необработанном щебне; $R_A < R_K$ – на щебне, обработанном ГКЖ-11; $R_A = R_K$ – на смеси зерен щебня с обработкой гидрофобизатором и без обработки.

Повышение макроструктурного разнообразия бетона путем использования заполнителей с избирательной адгезией ($R_A = R_K$) обеспечило увеличение прочности при сжатии образцов-кубов ($10 \times 10 \times 10$ см) до 24 %, модуля упругости до 27 %. Коэффициент поврежденности уменьшился до 29 %, водопоглощение до 19 %. Объем открытых капиллярных пор изменился до 2 раз, показатель их среднего

размера на 26 %, показатель однородности размеров на 30 %.

Разнообразие макроструктурных параметров бетона в одном образце-кубе подтвердилось широким диапазоном значений прочности, полученных с помощью прибора ИМС-МГ 4.01. Количественные показатели прочностных характеристик отличались для бетона на необработанном заполнителе до 40 %; для бетона на заполнителе, обработанном ГКЖ, до 30 %; для бетона на заполнителе с различным состоянием поверхности заполнителей до 45 %. Скорость прохождения ультразвукового импульса в локальных объемах одних и тех же кубов-образцов принятых составов различалась в интервалах: при $R_A > R_K$ – от $U=3,32$ м/с до $U=3,65$ м/с; при $R_A < R_K$ – от $U=3,31$ м/с до $U=3,94$ м/с; при $R_A = R_K$ – от $U=3,35$ м/с до $U=3,88$ м/с. Разброс значений свойств связан с тем, что в каждой ячейке, образованной заполнителями в матричной составляющей, создается своя сеть трещин и внутренних поверхностей раздела. Этим можно объяснить неаддитивность измене-

ния параметров активных элементов в отдельных ячейках при периодическом изменении влажности и температуры. Наиболее стойкими оказались образцы с избирательной адгезией матричного материала к поверхности заполнителей. Увеличение разнообразия структуры привело к изменениям сети трещин и ВПР, тем самым были созданы условия для адаптации материала изделия к знакопеременным воздействиям.

Выводы исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Можно заключить, что структурный подход является эффективным методологическим приемом, позволяющим исследовать конкретные изделия как определенные целостности с учетом структуры и свойств составляющих их частей. Для направленного создания взаимосвязанных разномасштабных структур с заданным набором элементов рационально

использовать внутренние резервы материала изделия. Факторами управления могут выступать параметры уровней структурных неоднородностей. Саморазвитие и самоподдержка сетей трещин и внутренних поверхностей раздела дают возможность проявиться эффектам адаптации материала, что позволяет изделиям-системам функционировать в течение проектного периода их службы. Взаимообусловленность структурной организации на различных уровнях неоднородностей материала является объективным процессом, который необходимо учитывать при назначении составов и технологических режимов производства изделий и конструкций в зависимости от их вида и назначения. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о перспективности сделанных теоретических допущений и необходимости продолжения исследований в этом направлении.

Список использованных источников

1. Выровой, В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства [Текст] / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов. – Одесса: ТЭС, 2010. – 169 с.
2. Системный подход к разработке и управлению качеством строительных материалов [Текст] / Ю. М. Баженов, А. М. Данилов, И. А. Гарькина [и др.]. – М.: ПАЛЕОТИП, 2006. – 188 с.
3. Прангишвили, И. В. Системный подход и общесистемные закономерности [Текст] / И. В. Прангишвили. – М.: Синтег, 2000. – 519 с.
4. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов [Текст] / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, А. Н. Бобрышев [и др.]. – Ташкент: ФАН, 1991. – 345 с.
5. Грушко, И. М. Повышение прочности и выносливости бетона [Текст] / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, Э. Д. Чихладзе. – Харьков: Вища школа, 1986. – 152 с.
6. Плугин, А. Н. Коллоидно-химические основы прочности и долговечности бетона и конструкций [Текст] / А. Н. Плугин, А. А. Плугин // Строительные материалы, 2007. – №7(631). – с.68-71.
7. Матурана, У. Древо познания: Биологические корни человеческого понимания [Текст] / У. Матурана, Ф. Варела. – М.: Прогресс-Традиция, 2001. – 224 с.
8. Пашенко, А. А. Теория цемента [Текст] / А.А. Пашенко, Е.А. Мясникова, В.С. Гумен, [и др.]. – К: Будівельник, 1991. – 168 с.
9. Суханов, В. Г. Структура материала в структуре конструкции [Текст] / В. Г. Суханов, В. Н. Выровой, О. А. Коробко. – Одесса: Полиграф, 2016. – 244 с.
10. Fic, S.B. Procesy samoorganizacji struktury kompozytowych materialow budowlanych [Text] / S.B. Fic, V.N. Vyrovoy, V.S. Dorofeev V.S. – Lublin: Politechnika Lublenska, 2013. – 143 p.

11. Выровой, В. Н. Бетон в условиях ударных воздействий [Текст] / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, С.Б. Фиц. – Одесса: Внешрекламсервис, 2004. – 270 с.

12. Коробко, О. А. Роль деформаций в "жизни" бетона [Текст] / О. А. Коробко, В. Н. Выровой, В.Г. Суханов [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №3 (29). – С. 114-121.

13. Хоменко, А. А. Развитие деформаций при локальном увлажнении строительных изделий и аналитическое описание процессов [Текст] / А. А. Хоменко // Motrol: commission of motorization and energetics in agriculture. – 2014. – Vol. 16, No. 5. – P. 249-254.

14. Шейнич, Л. А. Процессы самоорганизации структуры строительных композитов [Текст] / Л. А. Шейнич, Е. К. Пушкарева. – К.: Гамма-Принт, 2009. – 153 с.

15. Чернявский, В. Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон [Текст] / В. Л. Чернявский. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2008. – 412 с.

16. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А. В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

Коробко Оксана Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри архітектурних конструкцій, реставрації та реконструкції будівель, споруд та їх комплексів Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел.: (+038)096-36-90-522. E-mail: korobko1971@mail.ua.

Korobko Oksana Aleksandrovna, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Architectural Constructions, Restoration and Reconstruction of Buildings, Constructions and their Complexes Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel.: (+038)0963690522. E-mail: korobko1971@mail.ua.

Стаття прийнята 27.03.2017 р.