

Министерство образования и науки Украины
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И КОНСТРУКЦИИ: СТРУКТУРА, САМООРГАНИЗАЦИЯ, СВОЙСТВА

Под редакцией д-ра техн. наук В.Н. Вырового

Одесса – 2010

УДК

Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства.

Стержневой для монографии является концепция, согласно которой принципиально разные по механизмам действия процессы и явления приводят к возникновению одинаковых структурных элементов – технологических трещин и внутренних поверхностей раздела на различных уровнях структурных неоднородностей. Исходя из положения, что структура и свойства композиционных строительных материалов проявляются в конструкциях, описаны механизмы структурной самоорганизации при действии на конструкцию эксплуатационных нагрузок. Анализ конструкции как открытой сложной динамической системы позволил классифицировать элементы структуры материала по степени их реакции на действия внешних и внутренних факторов. Это позволило закладывать в структуру материала на стадии получения конструкции определенный набор структурных элементов, обеспечивающих безопасную работу конструкции при действии на нее эксплуатационных нагрузок. Проведенный анализ показал, что для реализации потенциальных возможностей материалов и конструкций следует учитывать работу материала в его структурном оформлении при действии на конструкцию внешних воздействий. Приведенные в монографии междисциплинарные исследования адресованы специалистам в области современного строительного материаловедения и проектирования строительных конструкций различного назначения.

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор П.В. Кривенко
д-р техн. наук, профессор В. Мозговой

Печатается по решению ученого совета Одесской государственной академии строительства и архитектуры (протокол № ___ от ___ мая 2010 г.)

ПРЕДИСЛОВИЕ

"Из разнообразия образуется прекраснейшая гармония"
(Гераклит Эфесский. Фрагменты. Фр. 8)

Одной из основных задач исследователей, проектировщиков и инженеров является обеспечение требуемого набора характеристик инженерных конструкций и их элементов при наименьшем расходе материалов. Эта задача, как показал накопленный опыт, может решаться различными путями. Эмпирический путь предполагает экспериментальное исследование конструкций или их моделей с большим перебором вариантов конструктивных решений, что связано с вложением значительных материальных и временных затрат и не гарантирует выход на оптимальное решение. Теоретические исследования многих поколений ученых и инженеров заложили основы проектирования конструкций и их элементов с учетом обеспечения их прочностных и деформативных характеристик. Принятые методы расчета дают возможность определить состояние элементов конструкции, при котором произойдет его разрушение или деформации превзойдут недопустимую величину (предельное состояние). Это позволяет получать численные значения прочности и деформаций для различных материалов при различных внешних воздействиях (расчетные характеристики прочности и деформируемости). Полученные численные значения используются для определения нагрузки или иного внешнего воздействия, соответствующему предельному состоянию (предельные нагрузки или предельное воздействие). Исходя из предельной нагрузки (воздействия) назначается нагрузка (воздействие), которая не должна быть превышена при эксплуатации конструкции (допустимая нагрузка, допустимые внешние воздействия).

Для оценки прочности элементов конструкции определяющее значение придается установлению связи между силами, действующими на эти элементы и изменением свойств материалов, из которых получены эти элементы. При этом свойство следует рассматривать как физическую категорию, которая обуславливает его различие или общность с другими предметами и обнаруживается в его отношении к ним. Одним из первых, кто связывал "сущности" (свойства) с самими предметами, был Аристотель (384-322г.г. до н.э.). Для получения численных значений прочности на разрыв металлической проволоки и прочности на изгиб балки на двух опорах Леонардо да Винчи (1452–1519 г.г.) предложил специальные методы испытаний. Была произведена замена интуитивной оценки пригодности материала для тех или иных конструкций на сравниваемую количественную оценку.

Возможность теоретического подхода к исследованию процесса деформирования тел связана с необходимостью принятия некоторой модели этих тел. Основанием формирования парадигмы, господствующей в последние столетия, можно считать работы Галилео Галилея (1564–1642г.г.). Он сформулировал основные законы разрушения материалов и изучил величины разрушающей нагрузки при растяжении и изгибе образцов (определил и оценил их предельное состояние). Роберт Гук (1635–1702г.г.) в 1678г. сформулировал закон упругого деформирования тел. Английский математик, механик, астроном и физик Исаак Ньютон (1643–1727г.г.) и один из первых академиков Петербургской АН немецкий физик и философ Георг Бюльфингер (1693–1750г.г.) рассмотрели нелинейные зависимости между нагрузкой и деформациями различных сред. Причины проявления упругих свойств и введение в употребление на русском языке слова "упругость" рассмотрены М.В.Ломоносовым (1711–1765г.г.) в трактате "Попытка теории упругой силы воздуха". Представления о дискретном (молекулярном) строении тел использовал в своих работах французский ученый и инженер Анри Навье (1785– 1836г.г.). Он считал, что упругие свойства проявляются в результате перемен во взаимном расположении и изменении силы взаимодействия молекул. В своих работах "Мемуар о кручении призм. Мемуар об изгибе призм", изданных в 1855-1856г.г., французский ученый Баре де Сен-Венан (1797–1886г.г.) отмечал: "... Но обычно нет необходимости рассматривать действительные или индивидуальные перемещения молекул, перемещения, которые хотя и мало отличаются от перемещений соседних молекул, но обычно изменяются от одной молекулы к другой по весьма сложному закону вследствие большого разнообразия их размещений и взаимодействий. Достаточно рассмотреть средние перемещения, которые представляют собой не что иное, как перемещения центров тяжести групп некоторого числа молекул. Каждая точка пространства, занятого телом, может рассматриваться как центр тяжести подобной группы, содержащейся в весьма малом, но конечном элементе этого пространства..." И далее "... средние перемещения изменяются обычно от одной точки тела к другой непрерывно и незначительно для малых расстояний, пропорционально расстояниям, пока они очень малы". Кроме того, Сен-Венан заложил основы теории пластичности и сформулировал в 1855г. т.н. принцип Сен-Венана, согласно которому внешняя система сил, приложенной к какой-либо части твердого тела, вызывает в нем напряжения, быстро убывающие по мере удаления от этой части, и может быть заменена эквивалентной системой сил.

В 1822г. Огюстен Луи Коши (1789–1857г.г.) ввел понятие о напряжении в точке. Соотношение между напряжениями и деформациями О.Коши получил исходя из допущений, что главные напряжения в этой точке совпадают по направлению с главными осями деформаций. Томас Юнг (1773–1829г.г.) пред-

ложил использовать в законе Гука относительные величины (напряжения и деформации), что позволяет получать для любого твердого материала коэффициенты пропорциональности (модули Юнга), которые характеризуют упругую постоянную материала. Примерно в это же время Симеон Дени Пуассон (1781–1842г.г.) упругие свойства материалов предложил оценивать по отношению относительных поперечных деформаций к относительным продольным деформациям прямого стержня при его растяжении или сжатии в области действия закона Гука (коэффициент Пуассона).

Теоретические исследования и накопившейся экспериментальный материал позволил перейти от модели дискретного строения материала к модели его сплошности (непрерывности). Согласно принятой модели тело, непрерывное до деформирования остается непрерывным и после деформирования. Базовая модель тела как сплошной среды предполагает его естественное ненапряженное состояние, (отсутствие начальных или остаточных напряжений). При оценке инженерных свойств материалов было принято выделять оформленные в образцы определенные их объемы в предположении, что свойства отдельных составляющих (компонентов) нивелируются. Это позволяет описывать сплошную среду принятыми средними характеристиками (континуальный подход).

В основе изучения поведения тел как сплошных сред был принят феноменологический подход, суть которого сводится к первичности экспериментальных данных. Это позволило создать методы расчета конструкций и их элементов, проверка которых осуществлялась экспериментальным путем.

Одновременно проводились исследования по выбору свойств материалов и принятия методов их количественной оценки. В силу того, что материал конструкций представлялся как непрерывный (сплошной), то при разработке методов оценки принятых свойств учитывались размеры образцов (объемы материала) в которых индивидуальные свойства отдельных компонентов осреднялись до средних свойств материалов. В основе разработки методов был положен эксперимент. Одним из первых, кто обратил внимание на необходимость применять количественные методы и точные измерения в естествознании был немецкий философ, теолог и ученый Николай Кузанский (1401–1464). В 1450 г. в диалоге "Об опытах с весами" он рассматривал опыт как источник познания и предлагал ввести количественные методы анализа.

Благодаря разработкам многих поколений выдающихся ученых и конструкторов были разработаны, апробированы и реализованы основные методы оценки свойств материалов, предложены надежные алгоритмы расчетов конструкций и сооружений. Использование предложенных методов расчета подтверждено многолетним опытом эксплуатации строительных объектов различного назначения.

Приведенные сведения позволяют заключить, что заложенные предшественниками основные научно-технические принципы расчета и проектирования строительных конструкций из материалов с комплексом заданных свойств, достаточно успешно прошли испытание временем.

В последние десятилетия в научном материаловедении утверждается концепция, согласно которой конечные свойства материалов определяются их структурой. Установить причинную связь между свойствами, принятыми для сплошной (неструктурированной) среды и структурой материала в рамках существующей парадигмы практически нельзя. Это связано с тем, что понятие "структура" не формализовано, не определены масштабные границы описания, не выделены элементы структуры, которые "отвечают" за проявление тех или иных свойств и т.п. В то же время можно считать установленным фактом существования определенной структурной организации любого объекта, включая материалы. Это стало возможным благодаря системному взгляду на мир естествоиспытателя, философа и теолога Пьера Тейярда де Шардена (1881-1955г.г.), создателю системного подхода Людвигу фон Бергаланфи (1901-), основоположнику термодинамики нелинейных процессов и процессов самоорганизации открытых систем лауреату Нобелевской премии Ильи Олеговичу Пригожину (1917-), "отцу" синергетики профессору Штутгартского университета Г.Хакену и многим другим исследователям.

Реальная прочность материала определяется количеством, ориентированием и видом дефектов. Установлено, что дефекты, включая трещины, следует рассматривать как своеобразные элементы структуры, которые способны проходить весь свой "жизненный" цикл – от рождения, через рост или укрупнение, до завершения своего развития. Благодаря работам А.Гриффитса и другим исследователям появилось и успешно развивается сравнительно новое научное направление - механика разрушения, целью которого является установление закономерностей развития трещин в различных средах. Механика разрушения основывается на априорной информации о существовании трещин в реальных материалах. Базовой моделью принята среда с плоской клиновидной трещиной. Таким образом, сплошность и континуальность среды нарушается при сохранении ее основных свойств, определенных для непрерывных сред. В этом, на наш взгляд, кроется основная причина ограниченного применения идей и методов механики разрушения при расчете отдельных конструктивных элементов и конструкций.

Перечисленные сведения позволяют заключить о формировании иных взглядов как на окружающую действительность, так и на материалы которые нас окружают. Материалы изначально структурированы и способны изменять свои структурные параметры под действием внутренних и внешних факторов. Формируется структурный подход при анализе становления материалов и реализа-

ции их свойств в конструкциях как открытых системах. В области строительного материаловедения структурный подход имеет давнюю историю – от работ в которых цементный камень, растворы и бетоны представлены как капиллярно-пористые тела до работ, в которых бетон рассматривается как адаптационные биогические системы. Обоснованно выделяются структурные элементы как на уровне вяжущих, так и на уровне самого бетона, которые, по мнению исследователей, формируют нормативные свойства и способность сохранять их в нормируемый период эксплуатации в различных условиях.

Авторы с глубокой благодарностью и признательностью относятся ко всем исследователям, научным сотрудникам и инженерам, которые не перечислены в предисловии и которые опубликовали результаты своих работ в монографиях и статьях. Выделение одних из ряда достойных нам представляется нецелесообразным и не логичным. Надеемся на понимание и надеемся, что наша работа внесет определенный вклад в формирование структурного подхода при оценке свойств композиционных строительных материалов и конструкций.

"Суть и случайность, связь их и дела,
Все – слитое столь дивно для сознания..."
(Данте А. "Божественная комедия")

1. ВВЕДЕНИЕ

Материалы, включая строительные, проявляют и реализуют свои свойства в объектах, для которых они предназначены – в отдельных деталях, конструктивных элементах, конструкциях, зданиях и сооружениях. Оформленные в определенные конструктивные формы материалы воспринимают весь комплекс действующих на объекты эксплуатационных нагрузок. Это дает основание предположить, что выполнение функционального назначения объектов зависит от способности материалов сохранять заданный набор свойств в течение требуемого периода эксплуатации. Для этого материал и сами объекты должны содержать определенный набор структурных элементов, которые способны, путем взаимодействия и взаимовлияние, изменять свои параметры в пределах, которые не вызывают изменение свойств материала и, следовательно, объекта.

Сложное строение композиционных строительных материалов (КСМ) позволяет рассматривать их как материалы, организованные по типу "структура в структуре" или "композит в композите". *Раздел 1* посвящен полиструктурному подходу при анализе структуры и формированию свойств КСМ различного назначения, полученные на вяжущих различной природы.

В *разделе 2* анализируется влияние наполнителей на прочность композиционных материалов. Показано, что прочность материалов в значительной степени зависит от его гетерогенности, которую, для минеральных вяжущих можно изменять при помощи наполнителей. Использование наполнителей рациональных по виду, количеству и дисперсности позволяют создавать систему кластерных структур, что вызывает повышение прочности микроструктуры бетонов.

В *разделе 3* рассматриваются физико-механические особенности организации структуры на микро- и макроуровнях бетонов. На уровне микроструктуры, которую можно представить как грубодисперсную высококонцентрированную лиофобную систему с лиофильной границей раздела фаз, структура организуется за счет взаимодействия частиц дисперсной фазы с образованием структурных агрегатов – кластеров. Макроструктура представлена неоднородностью типа "матричный материал – заполнители", структурные особенности которой определяются взаимодействием твердеющего вяжущего с поверхностью заполнителей различной природы. Показано, что в результате физико-механических процессов в микро- и макроструктурах спонтанно зарождаются новые структурные

элементы – технологические трещины (ТТ) и внутренние поверхности раздела (ВПР), которые в значительной степени определяют свойства КСМ.

Распределение объемных деформаций в средах, которые содержат в себе ТТ и ВПР рассматриваются в *разделе 4*. Показано, что для более объективной оценки объемных деформаций набухания и усадки следует учитывать происходящие при этом изменения ширины раскрытия ТТ и ВПР.

Раздел 5 посвящен вопросам самозарождения и развития технологических трещин в периоды начального структурообразования и последующего твердения композиций на основе минеральных вяжущих. Рассмотрены вопросы необратимого роста трещин, траектории подрастания. Особенно подчеркивается индивидуальность по рельефу и по вещественному составу противоположных берегов каждой трещины.

В силу того, что свойства материала проявляются в изделиях и конструкциях, то рассматривать отдельно свойства материалов без их конструктивного оформления представляется малоперспективным. Это предопределило содержание *раздела 6*. В разделе в кратком виде изложены основы системного подхода при анализе структуры конструкции как открытой сложной системы. В структуре конструкции выделены элементы, которые могут с разной степенью адекватности реагировать на внешние воздействия. Показано, что наличие активных элементов, к которым отнесены ТТ и ВПР, с одной стороны создают в материале перманентное неравновесное состояние и, с другой стороны – адекватно реагируют на внешние воздействия. На основе синергетического подхода рассмотрены явления самоорганизации материала конструкций при действии на них эксплуатационных нагрузок. Подчеркивается созидательная роль ТТ и ВПР, которые способны изменять свои параметры и взаимопревращаться, обеспечивая такую структурную реорганизацию при которой не происходит изменение свойств материала. Особенное внимание обращено на самосогласованное взаимодействие активных и метастабильных структурных элементов как одного из необходимых условий обеспечения внутренней безопасности конструкции как системы в течение всего нормируемого периода ее функционирования. Это послужило основанием для выделения всего "набора" активных структурных элементов в качестве управляющего фактора, который можно и нужно прогнозировано закладывать в структуру материала конструкции на технологическом этапе ее изготовления.

В *разделе 7* рассмотрены вопросы эффективного использования материалов в строительных конструкциях.

Предисловие, введение, раздел 1 и 3 подготовлены В.Н.Выровым; разделы 2, 4 и 5 подготовлены В.Н.Выровым и В.С.Дорофеевым; параграфы 6.1. и 6.2. подготовлены В.Г.Сухановым; параграфы 6.3, 6.4. и 6.5. подготовлены

В.Н.Выровым и В.Г.Сухановым; параграф 6.6. подготовлен В.С.Дорофеевым и В.Г.Сухановым. Творческое содружество авторов (В.Н.Вырового, В.С.Дорофеева и В.Г.Суханова) позволило подготовить *раздел 7*, заключение и терминологический словарь.

Авторы благодарят Е.С. Русакову за помощь в подготовке рукописи.

"Как в целом части все, послушную толпою,
сливаясь здесь, творят, живут одна другою!"
(Гете "Фауст")

2. ПОЛИСТРУКТУРНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композиционные (составные) материалы получают путем физико-химического и/или физико-механического соединения разнородных компонентов. Установлено [4, 5, 10, 17], что физико-технические характеристики конечного материала связаны нелинейно с характеристиками исходных компонентов. Можно предположить, что при взаимодействии компонентов образуются внутренние по отношению к материалу структуры, взаимодействие которых приводит к проявлению явлений синергизма. Как правило, КСМ состоят из вяжущего, наполнителей и заполнителей. Общее количество составляющих КСМ структур можно выделить по характерным структурным неоднородностям (рис. 2.1).

На каждом выделенном уровне структурной неоднородности материал можно описать с позиций линейной механики и структурной механики, или микромеханики [9, 10, 16, 19]. Представление материала как сплошной среды предполагает выделение объема, в котором индивидуальные свойства компонентов нивелируются (характерный размер M_i , рис. 2.1). Микромеханика изучает процессы, протекающие между отдельными компонентами при их взаимодействии как в процессе технологической переработки (технологическая микромеханика), так и в период эксплуатации материала [16, 20, ..., 22]. Выявление особенностей взаимодействия отдельных составляющих позволяет раскрыть механизм формирования средних характеристик на уровне M_i . В свою очередь, анализ взаимодействия структур на уровнях M_1 и M_2 ... M_{i-1} и M_i (с учетом взаимодействия компонентов m_1 ... m_2) вскрывает механизм формирования физико-технических характеристик КСМ с многоуровневой организацией структуры. Такие материалы целесообразно представлять как материалы типа "структура в структуре" или "композит в композите" [1... 9, 16].

Для каждого уровня выделенной структурной неоднородности допустимо появление трещин, длина которых a была бы меньше самой структурной неоднородности m_i , $a/m_i < 1$. Так как в материале возникают дефекты на различных масштабных уровнях, они являются опасными для одних "структур" и безопасными для других. В общем случае необходимо добиваться, чтобы трещины из более низких масштабных "структур" не прорастали бы в более высокие до размеров M_i , т.е. $a/m_i < 1$.

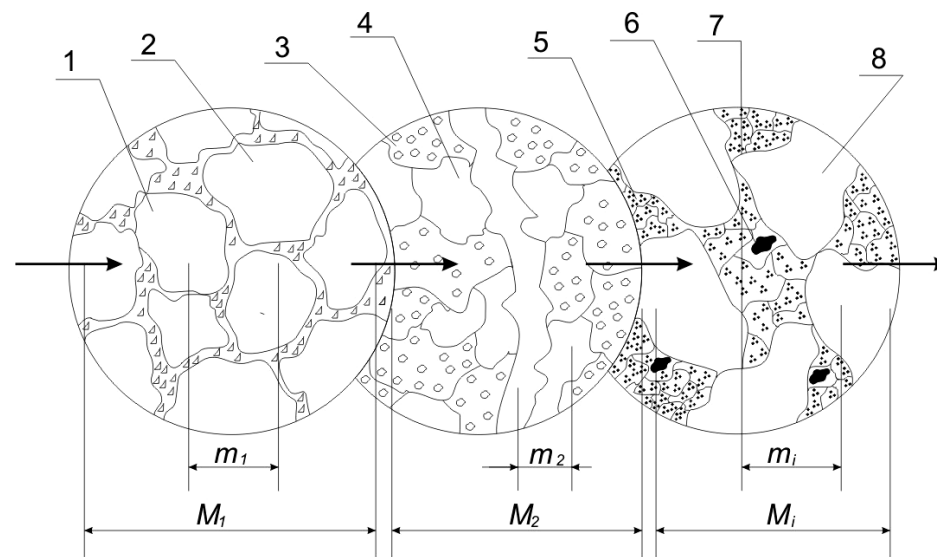


Рис. 2.1. Организация структуры композиционных строительных материалов: 1 – элементарный структурный элемент вяжущего (ЭСЭВ); 2 – наполнитель; 3 – цементный камень; 4 – мелкий заполнитель; 5 – макроструктурные трещины; 6 – поры; 7 – растворная часть (матрица); 8 – крупный заполнитель; m_1 , m_2 , M_1 , M_2 , ..., M_i – структурные масштабные уровни, на которых осредняются индивидуальные структурные неоднородности m_i .

Появление и развитие трещин в твердеющих материалах зависит от количества взаимодействующих фаз V , их механических характеристик, геометрических параметров гетерогенной системы Γ_c , геометрических характеристик композитных образца или конструкции Γ_k , величины ε и кинетики развития собственных объемных деформаций $d\varepsilon/dt$, изменение реологических характеристик твердеющей системы η , интенсивности и параметров технологических воздействий dU/dt :

$$a_i/m_i = f(V, \Gamma_c, \Gamma_k, \varepsilon, d\varepsilon/dt, dU/dt \dots) \quad (2.1)$$

Сложная функциональная зависимость зарождения и развития технологических трещин на характерных уровнях структурной неоднородности КСМ ставит задачу изучения механизмов структурообразования и разрушения композитов многоуровневой организации структуры. Проведенные исследования [1...9, 29...33] показали, что для качественного описания физико-механических процессов структурообразования и разрушения КСМ и установления количественных соотношений достаточно выделить две структуры: микро- и макроуровни.

На микроуровне КСМ характерной структурной неоднородностью является "вяжущее-наполнитель". Макроструктура представлена неоднородностью "растворная часть - наполнитель". При этом предполагается, что каждая выделенная структура состоит из своих структур более низкого масштабного уровня. Такие структуры в материале существуют не изолированно друг от друга. Прорастая с одного на другой масштабные уровни, они взаимодействуют между собой. Происходит своеобразная самоорганизация гетерогенной системы, когда структуры нижнего масштабного уровня инициируют организацию структуры более высокого масштабного уровня, что, в свою очередь, вызывает изменения исходных структур. Такая диалектическая взаимосвязь между структурами в полиструктурных КСМ требует дифференцированного изучения каждой структуры с последующим их соединением в композит.

Многоуровневая организация структуры КСМ достаточно четко прослеживается на бетонах, как наиболее массовой продукции промышленности строительных материалов (от субмикрорекристаллов гелевой составляющей с размером $10^{-8} \dots 10^{-10}$ м до неоднородности "растворная часть - наполнитель" с характерным размером $2 \cdot 10^{-2}$ м).

Микроструктура образуется путем совмещения низковязких вяжущих веществ и дисперсных наполнителей, включая дисперсную арматуру мелких фракций (цемента и воды, битума и порошка, полимера и наполнителя). Свойства микроструктуры определяются явлениями, протекающими в контакте жидкой и твердой фаз, т.е. зависят от количества наполнителя C'_v , его дисперсности S' , физико-химической активности поверхности v' , концентрации вяжущего вещества K' , количества опасных для данной структуры дефектов P' и других факторов. Микроструктура присуща связующим КСМ, под которыми понимают бинарные композиции, составленные из низковязких (пластичных) вяжущих веществ и наполнителей. Таким образом, свойства связующих определяется закономерностями и факторами, характерными для микроструктуры

$$R_m = f(C'_v, S', v', K', P' \dots). \quad (2.2)$$

Связующие имеют самостоятельное применение в виде клеев, мастик и замазок. При совмещении связующих с наполнителями и армирующими материалами образуются композиции, характеризующиеся макроструктурой. Таким образом, КСМ представляют как системы, скомпонованные из связующих и наполнителей, включая линейные и пространственные армирующие элементы. Свойства КСМ на макроуровне определяются количественным соотношением связующих и наполнителей их свойствами:

$$R_m = f(C_v, \eta_{em}, \eta_{ek}, R, \Gamma, p \dots). \quad (2.3)$$

где C_v – объемные части связующих и наполнителей в композите; η_{em}, η_{ek} – деформационные характеристики связующих и наполнителей; R – прочностные характеристики; ν_m – интенсивность сцепления в контакте связующее-наполнитель; Γ – геометрический фактор взаимного расположения компонентов в композите; p – количество опасных технологических дефектов для макроструктуры КСМ.

Взаимодействие отдельных компонентов и составляющих КСМ структур происходит по поверхностям раздела (ПР). Можно выделить три типа ПР, характерных для микро- и макроструктур КСМ:

1. При взаимодействии отдельных компонентов происходит их взаиморастворение (например, при армировании цементных матриц стеклянными нещелочестойкими волокнами).
2. Взаимодействие компонентов сопровождается химическими реакциями, в результате чего образуется переходный слой из модифицированного материала.
3. При взаимодействии компоненты не образуют переходные слои.

Выделенные типы ПР образуют свои "структуры" КСМ и должны обладать химической стабильностью на весь период эксплуатации и обеспечивать заданный уровень механических свойств для перераспределения технологических и эксплуатационных деформаций и напряжений между отдельными компонентами или структурами, предопределяя свойства гетерогенной среды как единого материала. Кроме того, образовавшиеся ПР способны ускорять или замедлять развитие трещин в системе, что необходимо учитывать при проектировании составов материала с минимальным количеством наследственных дефектов. В наполненных системах развитая площадь поверхности ПР способна модифицировать свойства готового материала и изменять условия его технологической переработки.

Установление оптимальных составов КСМ полиструктурного строения должно сводиться к оптимизации структуры и свойств связующих и собственно КСМ по всему комплексу факторов или по отдельным из них.

Многообразие КСМ с различной многоуровневой организацией структуры ставит задачу классификации их как на уровне микроструктур (связующих), так и на макроуровне.

По природе твердения связующие можно разделить на следующие группы:

1. Термопластичные, т.е. твердеющие при понижении температуры (вода и наполненные водные растворы, металлические, битумные и асфальтовые, полимерные на основе термопластов, на основе стекол, каменного литья, серы и др.).

2. Твердеющие в результате удаления части компонентов жидкой фазы – растворителей и разжижителей (лакокрасочные составы, вододисперсионные связующие, высыхающие мастики и др.).
3. Твердеющие при физико-химическом взаимодействии с газообразными средами, например, воздухом, углекислым газом, кислородом (связующие на основе воздушной извести, гипса, силикатные и др.).
4. Твердеющие при физико-химическом взаимодействии с жидкими средами – водой, растворами кислот, щелочей и солей, с образованием новых сложных соединений и комплексов (связующие на основе портландцементов и других гидравлических вяжущих и др.).
5. Твердеющие в результате полимеризационных и поликонденсационных процессов (на основе терморезистивных олигомеров, некоторых мономеров термопластичных смол и их композиций – замазки, связующие полимербетонов, стеклопластиков и древопластиков).
6. Твердеющие при высокотемпературном нагреве (обжиге) в результате превращений образующих минералов (керамические и др.).

Нередко твердение связующих обусловлено одновременно несколькими из перечисленных механизмов, однако всегда один из них является доминирующим.

Обязательное условие существования КСМ – непрерывность связующего в качестве объединяющего компонента. Частицы наполнителей вызывают лишь локальные нарушения, не затрагивая общую непрерывность микроструктуры. Для получения КСМ полиструктурного строения необходимо, чтобы часть компонентов, хотя бы один из них, присутствовали в жидком, точнее, в пластичном виде.

Классификацию КСМ на макроуровне целесообразно проводить по виду и назначению наполнителей (армирующих элементов):

1. Строительные композиты с наполнителями в виде гранул правильной и неправильной формы (бетоны и подобные им материалы). Бетоны могут содержать хаотично расположенную арматуру, поперечные размеры элементов которой соизмеримы с крупностью наполнителей.
2. КСМ, насыщенные линейными (стержневыми) армирующими элементами с оптимальным геометрическим расположением в их структуре и по объему композитных изделий (железобетон, армополимербетон). На этом пути КСМ при объединении элементов арматуры в объемный каркас трансформируются в КСМ, составленные из связующих и волокнистых наполнителей (некоторые стеклопластики и древесные пластики, асбестоцемент, арболит, камышит и др.).

3. КСМ, составленные из связующих и ориентированных волокнистых наполнителей, объединенных в плоские армирующие элементы (СВАМ, стеклотекстолиты, фанера, древесностроительные пластики и др.).
4. КСМ, скомпонованные из связующих и наполнителей, объединенных в каркасы по объему изделий (каркасные, полые строительные элементы).

Предложенная классификация по виду и назначению наполнителей предполагает, что упруго-механические характеристики и их плотность могут быть выше, равной, или ниже упруго-механическим характеристикам и плотности связующего.

Таким образом, по мере усложнения структуры прослеживается постепенный переход от мономинералов (моноструктур) к полиструктурным КСМ и далее к композиционным строительным конструкциям. Назначения видов микро- и макроструктур КСМ необходимо производить с учетом назначения и вида композиционной конструкции.

Проведенный анализ показывает, что композиционные строительные материалы представляют собой составные многокомпонентные среды со сложной организацией структуры по типу "структура в структуре" или "композит в композите". Такая сложная организация структур КСМ является объединяющим началом материалов различной природы связующего, наполнителей и физико-технических свойств. Это позволяет целенаправленно использовать отдельные структурные элементы и целые "структуры", а также технологические приемы и способы для получения конечного продукта с повышенными механическими характеристиками и эксплуатационной надежностью.

Дальнейшее совершенствование технологии, структуры и свойств КСМ полиструктурного строения связано с учетом процессов структурообразования на разных масштабных уровнях материала с целью снижения общего количества и ограничения роста технологических дефектов. При проектировании оптимальных структур необходимо учитывать как геометрические параметры КСМ, влияющие на процессы структурообразования макроуровня, так и вид и свойства внутренних ПР, физико-химические и физико-механические процессы взаимодействий компонентов, условия технологического воздействия на эти процессы. Это позволит достаточно надежно прогнозировать свойства КСМ по свойствам исходных компонентов.

"Безумствует распад.
Но – все-таки – виват! –
профессия рождать
древней, чем убивать"

(А. Вознесенский. Строки Роберту Лоуэллу)

3. ПРОЧНОСТЬ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Применение наполнителей позволяет повысить прочность композиционных материалов. Это связывают с повышением энергии разрушения гетерогенной среды. Колб Р. Л. и Парих Н. М. [51] исходили из предположения, что границы зерен служат источником зарождения трещин, и энергия границы раздела должна влиять на величину разрушающего напряжения σ_f :

$$\sigma_f = \left[\frac{E \left(\gamma_1 - \frac{1}{2} \gamma_2 \right) 2W}{a D / 10} \right], \quad (3.1)$$

где a – межзатомное расстояние; γ_1 – действительная поверхностная энергия; γ_2 – энергия границы зерна; W – ширина границы зерна; D – диаметр зерна.

Ленг Ф.Ф. [52], анализируя повышение энергии разрушения материалов с дисперсными частицами, пришел к выводу, что дисперсные частицы способны взаимодействовать с фронтом трещин. Поэтому энергия разрушения связывается с энергией разрушения материала матрицы γ_0 , линейной энергии на единицу длины фронта трещины T , и расстояния между дискретными частицами d :

$$\gamma = \gamma_0 + (T/d). \quad (3.2)$$

Расстояние между частицами наполнителя можно определить, зная их размер D и объемное содержание в материале V :

$$d = \frac{10(1-V)}{3V}. \quad (3.3)$$

При этом обращается внимание, что размер разрушающей трещины зависит от удельной поверхностной энергии γ , концентрации напряжений в районе устья трещины A , модуля упругости материала E и величины разрушающего напряжения σ_f :

$$c = A^2 \gamma E / \sigma_f^2 \quad (3.4)$$

Кроме того, дисперсные частицы упрочняют материал путем сдерживания направленного движения дислокаций [53]. Линия дислокаций выгибается между частицами в петли, которые за каждой частицей имеют разные знаки, что вызы-

вает их смыкание, аннигиляцию и образование вокруг частиц дислокационных полей. При расстоянии между частицами l наибольшее сопротивление движению дислокаций будет в случае, если радиус их петли r будет равен $r = l/2$, тогда максимальное касательное напряжение τ_{max} определяется зависимостью

$$\tau_{max} = Gb/l \quad (3.5)$$

где G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; l – расстояние между дисперсными частицами.

При уменьшении расстояния между дисперсными частицами и возрастании τ_{max} дислокации начинают проходить через включения и перерезают их.

Предложенные зависимости влияния наполнителей на прочность КМ справедливы, по нашему мнению, для группы материалов, состоящих из изотропной матрицы, в которой равномерно распределены частицы наполнителя одного размера. В этом случае граница раздела матричного материала с включениями может служить как источником зарождения трещин и снижения прочности материала, так и своеобразным стопором зарождения и развития трещин и повышения механических характеристик КМ. Общая протяженность поверхности раздела матричного материала и наполнителей (включая модифицированный слой границ раздела) определяется количеством (расходом) наполнителя P_n и его удельной поверхностью S_n :

$$S_{np} = P_n \cdot S_n, \quad (3.6)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что прочность композиционных строительных материалов на микроуровне определяется его гетерогенностью (прочность как функция гетерогенности материала). Физико-технические свойства (энергия разрушения γ) матричного материала и включений учитываются через энергию разрушения матрицы и удельную поверхностную энергию границ раздела:

$$\gamma = \gamma_m + \gamma_n (P_n S_n), \quad (3.7)$$

где P_n – количество наполнителей; γ_m – энергия разрушения материала матрицы; S_n – удельная поверхность наполнителя; γ_n – удельная поверхностная энергия границы раздела.

Так как условия продвижения фронта трещины определяются и расстоянием между наполнителями (количеством его), то (2.7) можно преобразовать:

$$\gamma = \gamma_m + \frac{3}{2} \gamma_n V_n / D_n (1 - V_n), \quad (3.8)$$

где V_n – объемное содержание наполнителей.

Таким образом, для материалов, наполненных дискретными частицами, гетерогенность которых определяется видом и количеством наполнителей, прочность является функцией гетерогенности материала

$$R = f(V_n, S_{n\gamma}, \gamma_m, \gamma_n \dots). \quad (3.9)$$

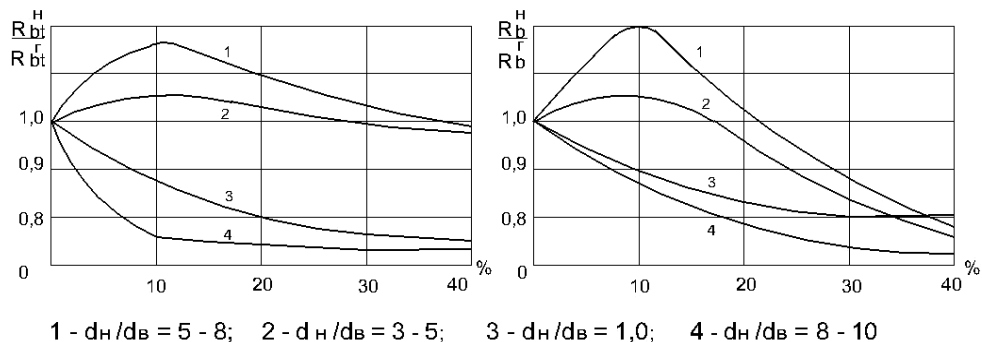


Рис. 3.1. Влияние количества и дисперсности наполнителей на прочность наполненных композиций.

а – n/p – постоянное; **б** - S_n – постоянное.

Логично предположить, что прочность таких наполненных систем будет зависеть как от количества наполнителей, так и их дисперсности (рис. 3.1).

В зависимости от технико-экономических требований прочность наполненных композиций можно изменять путем измерения количества и дисперсности наполнителей.

Известно [54, 55], что структурообразование КСМ с использованием минеральных вяжущих сопровождается образованием дискретных структурных агрегатов – кластеров. Кластеры представляют собой систему дисперсных частиц, сгруппировавшихся вокруг "структурообразующей" частицы и взаимодействующих путем непосредственного контактирования или через дисперсионную среду. Характеризуются кластеры координационным числом структурообразующей частицы; условиями контактирования частиц в кластере; величиной поверхностной энергии границы раздела кластера; способностью релаксировать напряжения на границе раздела и внутри кластера; природой и дисперсностью составляющих его частиц; способностью взаимодействовать с соседними структурными агрегатами с образованием систем типа "кластер в кластере".

Образование кластерных структур изменяет гетерогенность материала и условия его структурообразования и разрушения. Поверхности раздела между структурными агрегатами являются теми гетерогенными фазами, которые могут способствовать или сдерживать зарождение и развитие трещин в периодически организованной среде. Суммарная площадь поверхности раздела между структурными агрегатами зависит от объема кластеров и их количества в материале.

Если предположить, что кластер нижнего масштабного уровня K_1 включает в себя частицы наполнителя размером D_n , то объем кластера K_1 составит

$$V_{K1} = \frac{\pi}{6} D_n^3 \quad (3.10)$$

или

$$V_{K1} = \pi/2 (6D_{ЭСЭВ} + D_n)^3, \quad (3.11)$$

где $D_{ЭСЭВ}$ - размер элементарного структурного элемента вяжущего (например, зерна цемента).

Таким образом, объем кластеров K_1 определяется в основном размером частиц наполнителя. При взаимодействии кластеров и образовании $K_{1...i}$ на каждом уровне кластерных структур длина поверхностей раздела будет равна приведенному радиусу r_k кластеров соответствующего масштабного уровня (рис.3.2).

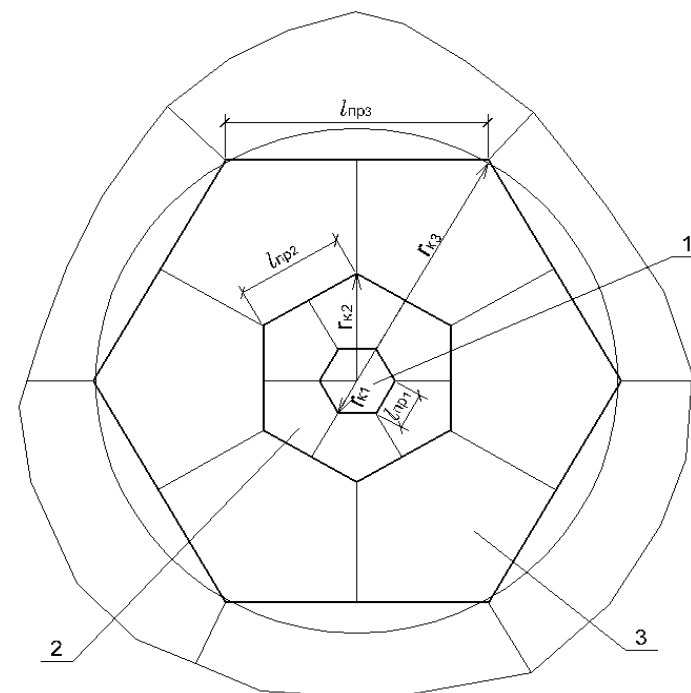


Рис. 3.2. Длина поверхностей раздела между кластерами различного масштабного уровня.

1 – кластер K_1 , 2 – кластер K_2 , 3 – кластер K_3 , r_k - радиус кластеров; $l_{пр}$ – длина поверхностей раздела между кластерами различного масштабного уровня.

С увеличением масштабного уровня кластеров увеличивается число частиц наполнителя до n . Объемную долю частиц в кластере можно определить, зная размер кластера r_k , количество частиц n и их размер D_n :

$$V_n = \frac{(n\pi/6)D_n^3}{(\pi/2)r_k^2 D_n} \quad (3.12)$$

После преобразования

$$V_n = \frac{n}{2} \cdot \frac{D_n}{r_k^2} \quad (3.13)$$

Таким образом, объем и количество кластеров определяются количеством и размером частиц наполнителя, а также соотношением поверхностных активностей частиц наполнителя и зерен вяжущего. В свою очередь, объем и количество кластеров определяют вид и суммарную площадь внутренних межкластерных поверхностей раздела. Так как прочность является функцией гетерогенности материала, логично предположить, что физико-технические свойства наполненных дисперсных композиций зависят от начальной поврежденности материала внутренними границами раздела. Проведенные расчеты количества кластеров в зависимости от размера частиц кварцевого наполнителя в цементных композициях равной подвижности показали, что при равных объемных количествах наполнителя с увеличением их размера уменьшается количество кластеров.

Размер опасной для данной структуры трещины зависит от размера структурных агрегатов, r_k , размера D_n и количества наполнителей V_n :

$$a = D_n \left[\frac{V_n^{1/3}}{\sqrt{3}} - \frac{1}{3} \right] \quad (3.14)$$

Поэтому представляет интерес установление зависимости прочности наполненных цементных композиций от размера кластеров K_1 , их количества V_n и длины межкластерных трещин a . Опыты проводились на бездобавочном цементе Одесского завода с размером отдельных зерен $d_n \approx 20$ мкм. В качестве наполнителя применялся рассеянный на фракции молотый кварцевый песок ($0 < d_{n1} < 50$; $50 < d_{n2} < 100$ мкм; $100 < d_{n3} < 160$ мкм; $160 < d_{n4} < 314$). Установлено, что прочность цементного порошка на разрыв в среднем на порядок выше прочности на разрыв кварцевых наполнителей. Поэтому принято, что при превышении поверхностной активности зерен цемента над поверхностной активностью частиц наполнителя последние входят в кластеры вяжущего, образуя смешанный кластер "вяжущее + наполнитель" [54, 55]. При этом оптимальное соотношение размеров частиц наполнителя d_n и зерен цемента d_n находится в пределах

$d_n / d_n = 3...10$. При таких соотношениях размеров количество кластеров уменьшается, что ведет к увеличению прочности наполненных цементных композиций.

Так как количество кластеров K_1 и длина трещин a , кроме размера частиц наполнителя, зависят и от его количества, то существует оптимальный расход

наполнителя, при котором прочность цементных композиций максимальна в условиях опыта.

Существование экстремальной зависимости прочности от количества наполнителей связано с физико-механическими процессами начального кластерообразования наполненных цементных композиций. При увеличении однофракционных наполнителей сверх оптимального количества расстояние между частицами уменьшается, что вызывает увеличение энергии их взаимодействия. Это может привести к образованию кластеров наполнителей, внутри которых частицы связаны между собой слабее, по сравнению с силой связи частиц в смешанных кластерах "вяжущее + наполнитель". Можно предположить, что в этом случае кластеры наполнителей в дисперсном вяжущем являются разупрочняющим элементом (размер трещин a спонтанно увеличивается на величину кластера наполнителей $2 r_k$).

Можно сделать вывод, что для композиционных строительных материалов, гетерогенность которых определяется внутренними межструктурными границами раздела (практически для всех дисперсных вяжущих), прочность является функцией внутренних наследственных трещин. В свою очередь, количество внутренних трещин и их протяженность зависят от соотношения поверхностных активностей зерен вяжущего и частиц наполнителей, которое определяет дисперсность и количество наполнителя. При сохранении общей качественной зависимости прочности от гетерогенности материала для дисперсных композиций можно записать

$$R = f \{F_B/F_n; D_n; V_n/V_B\} \quad (3.15)$$

где F_B, F_n - поверхностные активности частиц вяжущего и наполнителя; D_n - дисперсность наполнителя; V_n, V_B - количество наполнителя и вяжущего.

Проведенные исследования позволяют сделать заключение, что прочность микроструктуры композиционных строительных материалов является функцией их гетерогенности, которая определяется межкластерными поверхностями раздела. Управлять внутренними границами раздела можно введением в систему определенного количества наполнителей, которые характеризуются поверхностной активностью и дисперсностью.

"Из огня и воды, их мельчайше части смешав,
Создал яхонта зерна и жемчуга жирный состав".
(Низами "Сокровищница тайн")

4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОЛИСТРУКТУРНОГО СТРОЕНИЯ

4.1. Физико-механические особенности структурообразования микро- структуры композиционных строительных материалов

Физико-химические процессы гидратации цементных вяжущих достаточно подробно освещены в специальной литературе [39...43]. Так как при смешивании цемента с водой образуется высококонцентрированная дисперсная система, в которой происходят межчастичные взаимодействия и гидратация твердой фазы сопровождается уменьшением объема системы "твердое + жидкость", представляет интерес механизм структурообразования такой системы.

Для характеристики высококонцентрированных дисперсных систем применимы следующие определения [13, 20, 23...30]. Дисперсная система - совокупность дисперсионной среды с дисперсными включениями в виде отдельных частиц и их агрегатов. Дисперсионная среда - непрерывная среда (вакуум, газ или жидкость), в которой распределена дисперсная фаза. Фаза - структурно-однородная часть гетерогенной системы, ограниченная ПР. Дисперсная частица (зерно) - дискретная часть вещества (твердого, жидкого или газообразного) с достаточно четко выраженной поверхностью. Поверхность дисперсионной фазы (отдельной частицы или их агрегатов) - поверхность, принадлежащая дисперсионной фазе, в окрестностях которой рассматриваются процессы ее взаимодействия с окружающей дисперсионной средой или соседней дисперсионной фазой. Кластер - группа дискретных частиц, скрепленных силами межчастичного взаимодействия (электростатической природы, молекулярными силами, капиллярными силами), которая в рассматриваемых условиях ведет себя как единое целое. Поверхностная энергия - избыток энергии на поверхности дисперсионной фазы (некомпенсированная энергия). Элементарный структурный агрегат - наименьший объем содружества частиц. Набор элементарных структурных агрегатов позволяет получить более сложную структуру дисперсионной системы.

Высококонцентрированную дисперсную систему (ЭСЭВ + вода) можно представить как топологически неупорядоченную. Избыточная поверхностная энергия дисперсионной фазы превращает систему в термодинамически неустойчивую. Стремясь к равновесному состоянию, дисперсионная фаза стремится умень-

шить ПР с дисперсионной средой. Происходит снижение внутренней поверхностной энергии, за счет чего дисперсионная система переходит в метастабильное состояние. Известные термодинамические функции [23, 25] описывают макropоведение дисперсионной системы и условия ее перехода из одного состояния в другое. Представляет интерес механизм уменьшения внутренних ПР за счет образования структурных агрегатов - кластеров. Таким образом, при анализе механизмов агрегатирования будем исходить из условий, что дисперсионные частицы обязательно агрегируют; в зависимости от энергий взаимодействия дисперсионных частиц друг с другом и с дисперсионной средой, частицы способны вступать в непосредственный контакт или взаимодействовать через дисперсионную среду; дисперсионная фаза содержит частицы с повышенной поверхностной активностью - "структурообразующие" частицы, вокруг которых группируются остальные; реакции гидратации способствуют фиксации образовавшейся структуры дисперсионной фазы; сила взаимодействия частиц больше или равно их массе, что предотвращает их самопроизвольный отрыв в гравитационном поле. Рассмотрим механизм образования элементарного структурного агрегата - кластера нижнего масштабного уровня К-1.

Силовое поле "структурообразующей" частицы вызывает сближение соседних рядовых частиц. Число взаимодействующих частиц можно определить координационным числом. Координационное число зависит от соотношения диаметров взаимодействующих частиц. Геометрические расчеты показывают, что при одинаковом диаметре частиц в виде сфер координационное число составляет 12. Рядовые частицы сближаются каждая к своей "структурообразующей" частице. При этом, за счет сближения частиц до расстояний ближней коагуляции [23, 27], внутри выделившегося структурного агрегата энергия сцепления выше, чем энергия взаимодействия между соседними кластерами. Расстояние между рядом расположенными элементарными структурными агрегатами постепенно увеличивается, что еще больше уменьшает силу связи между ними. Заняв узлы энергетического минимума (по Дерягину), частицы как бы фиксируют образовавшуюся кластерную структуру. Реакции гидратации ведут к химическому связыванию воды и образованию на поверхностях ЭСЭВ сольватных оболочек. Происходит уменьшение объема дисперсионной среды при одновременном увеличении объема дисперсионной фазы. За счет самопроизвольного увеличения объемов ЭСЭВ частички преодолевают энергетический барьер, что ведет к очередному этапу их сближения со структурообразующей частицей. Этому способствует и уменьшение объема дисперсионной среды. При достаточном изменении оводнения дисперсионной системы между ЭСЭВ внутри кластера К-1 могут возникнуть своеобразные "манжеты", что ведет к упрочнению К-1 за счет капиллярных сил. Кроме того, на начальных этапах структурообразования и образова-

ния межчастичных контактных перешейков возможен диффузионный перенос вещества ЭСЭВ в зону контакта. Это упрочняет силу связи между ЭСЭВ внутри структурного агрегата и превращает его в самостоятельный структурный элемент.

Высококонтрированная дисперсная система изменяет на этом этапе структурообразования размер дисперсной фазы. Стремясь к очередному уменьшению внутренней поверхностной энергии и за счет продолжающихся усадочных деформаций, система структурируется за счет взаимодействия элементарных структурных агрегатов между собой. Образуются кластеры следующего масштабного уровня К-2...К-1. Логично предположить, что образование К-1 и последующих кластеров вплоть до К-1 происходит практически одновременно.

Разнонаправленность перемещения ЭСЭВ при образовании элементарных структурных агрегатов и их перемещение в разных направлениях в случае роста кластеров создает на их ПР разнонаправленные деформации и развитие напряжений растяжения и сдвига. При общих сжимающих напряжениях внутри кластерных структур напряжения растяжения и сдвига деформируют ПР и форму кластеров. Продолжающиеся усадочные деформации каждого кластера ведут к необратимому индивидуальному изменению их ПР.

В случае превышения усадочных деформаций внутри кластера над критическими пластическими деформациями материала межчастичных контактных перешейков происходит разрыв последних. Межкластерные ПР превращаются в зародышевые трещины.

Удельная поверхность возникшего в результате реакций гидратации гидросиликатного (тоберморитового) геля составляет $2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{г}$ [26]. Субмикросталлы геля занимают межчастичное пространство и становятся дисперсной фазой. Логично предположить, что за счет развитой поверхности и за счет термофлуктуационных явлений частицы геля объединяются в свои структурные блоки. Энергетические условия объединения тонкодисперсных частиц в агрегаты подробно описаны в курсах коллоидной химии в разделах поверхностных явлений в дисперсных системах. Таким образом, твердеющая цементно-водная система представляет собой сложноструктурируемую на различных масштабных уровнях систему. В результате межчастичных контактных взаимодействий высококонцентрированной дисперсной системы с частицами различного размера образуются сложные дискретные структуры многоуровневой организации. Их можно представить как "кластерные структуры в кластерных структурах".

Можно сделать вывод, что структурообразование дисперсной системы, "ЭСЭВ + вода" сопровождается образованием отдельных структурных блоков различного масштабного уровня, разделенных и взаимодействующих через ПР. Образовавшиеся ПР являются внешними по отношению к кластерным структу-

рам и внутренними по отношению к композитному материалу. Начально топологически неупорядоченная дисперсная система превращается в периодически организованную. Это позволяет утверждать, что появление структурных агрегатов на начальных этапах структурообразования превращает непрерывную среду в кусочнооднородную. Появившиеся внутренние, по отношению к системе, ПР сохраняют за собой потенциальную возможность трансформироваться в зародышевые трещины и входить в структуру затвердевшего материала, определяя его поврежденность технологическими дефектами.

Управлять процессами начального структурообразования дисперсной системы "ЭСЭВ + вода" можно, изменяя условия межчастичных контактных взаимодействий и вводя в систему частицы иной природы и поверхностной активности.

Введение в дисперсные системы поверхностно-активных веществ (ПАВ) полностью изменяет механизм межчастичных контактных взаимодействий [20, 23, 24, 27]. Адсорбируясь на границе раздела "твердое - жидкость", ПАВ могут изменить молекулярное состояние твердой поверхности. Кроме того, изменяются величины поверхностного натяжения на границе раздела фаз. Это может привести к снижению внутренней поверхностной энергии без образования структурных агрегатов (возможно даже увеличение удельной поверхности дисперсной фазы за счет распада агрегатов ЭСЭВ на отдельные частицы). Механизм структурообразования высококонцентрированных дисперсных систем "ЭКЭ + вода" требует своего самостоятельного анализа;

Кластерообразование дисперсных систем "ЭСЭВ + наполнитель + вода" зависит от соотношения поверхностной активности частичек наполнителя и вяжущего, их дисперсности и объемного содержания.

При превышении поверхностной активности частичек наполнителя над активностью ЭСЭВ дисперсность их должна быть одинаковой [29, 30].

В случае превышения поверхностной активности ЭСЭВ над поверхностной активностью частичек наполнителя размер последних должен в 3...10 раз превышать размер ЭСЭВ [29, 30, 31]. Это не нарушает структуру твердеющей системы и способствует снижению поврежденности наследственными дефектами. При такой ситуации появляется возможность поэтапной организации структуры применением наполнителей необходимой дисперсности. Опыты, проведенные на бездобавочном цементе Одесского завода с размером ЭСЭВ около 20 мкм показали, что введение наполнителей оптимальной крупности ведет к повышению прочности цементных композиций (рис. 4.1).

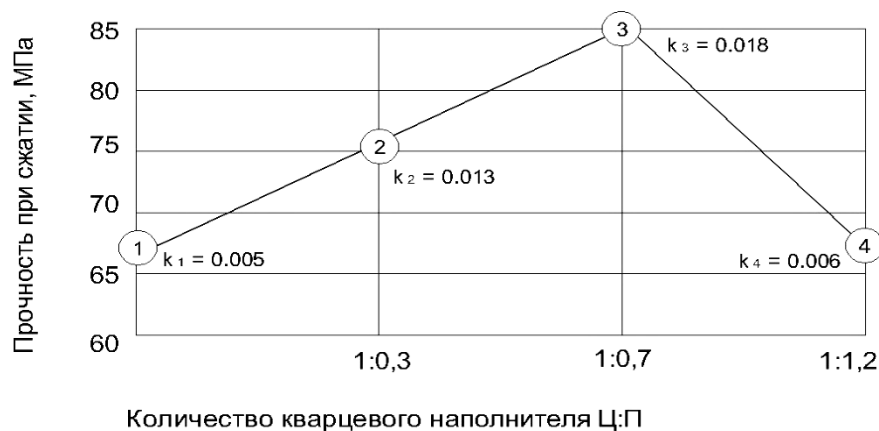


Рис. 4.1. Влияние оптимальной крупности наполнителей на прочность цементных композиций и их поврежденность.

1 – бездобавочный цемент; 2 – $d_n = 80$ мкм; 3 – $d_n = 80$ и 140 мкм; 4 – $d_n = 80$, 140 и 320 мкм.

Поврежденность цементных композиций оценивали через коэффициент поврежденности K - отношение площади, ограниченной поверхностными трещинами S_0 , к площади образца, на которой эти трещины появились S , $K = S_0 / S$. Анализ результатов показал, что при увеличении K (снижении поврежденности) прочность при сжатии наполненных цементных композиций увеличивается (опыты проводились на образцах-балочках размером 4x4x16, испытанных на 28 сутки нормального хранения; подвижность цементного теста во всех случаях была постоянной). Суммарная длина поверхностных трещин, измеренная на трех образцах и отнесенная к площадке 4 x 16 см образцов максимальной прочности, в два раза меньше по сравнению с суммарной длиной трещин на образцах, изготовленных из бездобавочного цемента (2,13 м против 4,46 м).

Проведенный анализ показал, что в результате физико-механических взаимодействий высококонцентрированная дисперсная система "ЭСЭВ + вода" в начальные периоды структурообразования образует кластерные структуры с внутренними, по отношению к материалу, ПР. Управлять кластерообразованием дисперсных систем и поврежденностью технологическими дефектами затвердевших цементных композиций можно применением наполнителей оптимальной крупности. Это позволяет поэтапно организовывать структуру системы и получать наполненные цементные композиции, прочность которых выше прочности бездобавочных цементов.

4.2. Механизм структурообразования композиционных строительных материалов на макроуровне

Макроструктура бетонов на плотных и пористых заполнителях представлена структурной неоднородностью типа "матрица - заполнители". Под матричным материалом понимают растворную часть при использовании крупных заполнителей и цементный камень – для растворов. По мнению [35], к заполнителям относят дискретные частицы произвольной формы, агрегатного состояния и поверхностной активности, размер которых вызывает появление деформаций и напряжений в окружающем матричном материале. Можно выделить несколько признаков, которые отличают бетоны от других матричных композиционных материалов. К ним можно отнести высокое объемное содержание крупных и мелких заполнителей (до 80% по объему) и образование ВПР одновременно с получением бетонной смеси. Таким образом, рассматривать механизмы формирования макроструктуры бетонов следует с учетом взаимодействия матричного материала по границам его раздела с заполнителями.

В работах [] отмечается влияние свойств заполнителей на свойства бетона. При этом предлагаются различные модели макроструктуры бетона, учитывающие объемную концентрацию заполнителей, их форму, соотношение деформативных и прочностных характеристик растворной части и заполнителей. В некоторых моделях предлагается вводить еще один структурный элемент – модифицированный слой определенной толщины на границах раздела растворной части и заполнителей. При этом свойства материала этого слоя отличаются от свойств других составляющих. Предложены аналитические зависимости расчета деформативных и прочностных характеристик бетонов, основанные на правилах смеси или на сохранении законов аддитивности. Как правило, расчетные значения и экспериментальные результаты далеки от удовлетворительной сходимости.

Многие авторы, при рассмотрении механизмов формирования структуры бетонов с использованием плотных и пористых заполнителей, отмечают достаточно активную роль заполнителей в создании в окружающем растворе напряжений различного знака, что может служить предпосылкой формирования остаточных напряжений. Особенная роль пористых заполнителей в структурообразовании матричного материала подчеркивается в работах []. Анализ механизмов распределения деформаций и напряжений, при уменьшении объема растворной части при твердении и при эксплуатации, позволил заключить, что в растворной части могут возникнуть несплошности в виде трещин. Предложенная Лермитом методика оценки трещиностойкости твердеющих цементных композиций и растворов, основана на поведении модели бетона с единичным включением. Следу-

ет отметить, что данная методика предполагает обязательное нарушение целостности кольца из матричного материала. Трещиностойкость оценивается сравнением сроков, при которых произойдет разрыв кольца из материалов различных качественного и количественного составов.

Анализ механизмов формирования макроструктуры бетонов как матричных композитов, проведенный на моделях структурных ячеек бетонов различными методами показал, что в твердеющем матричном материале возникают градиенты деформаций по величине и направлению. Распределение деформаций и их градиентов зависят от геометрических характеристик макроструктуры, количества, фракционного состава и ориентирования заполнителей. При одинаковых геометрических характеристик распределение деформаций определяется соотношением адгезионно-когезионных сил связи на границе раздела. Следует отметить, что под действием градиентом деформаций и в зависимости от уровня связи на границах раздела, последние могут изменять свою форму. Явления формоизменения инициируют локализацию деформаций сдвига, что может быть причиной зарождения технологических трещин [].

Проведенный анализ макроструктуры бетона и механизмов ее формирования позволяет заключить, что в бетоне, как матричном композиционном материале, все компоненты несут ответственность при формировании структуры и служебных свойств готового материала. Как отмечалось ранее, отличительной характеристикой бетонов можно считать образование ВПП одновременно с образованием бетонных смесей. Таким образом, общая площадь поверхности ВПП с учетом рельефа заполнителей, сами заполнители и матричный материал можно считать исходными данными, которые определяют последующие процессы их взаимодействия. В работах [] в качестве моделей структурной ячейки бетона приняты плоские модели, в которых заполнители представлены в виде дисков, цилиндров или квадратов. Применение таких заполнителей позволяет получать информацию об интегральных процессах, протекающих на уровне выделенной структурной группы. В тоже время, не исключены ситуации, при которых возникают и развиваются локальные градиенты деформаций, причиной которых может быть форма и рельеф поверхности заполнителей. В работе [] на качественном уровне показано объективное существование остаточных микродеформаций.

В наших исследованиях анализ проводили графоаналитическим методом. При анализе плоских моделей структурных ячеек бетонов форма заполнителей принята в виде квадрата. Приведенное расстояние между заполнителями h при различном их ориентировании принято $h=0.2R$, где R приведенный радиус (рис. 4.2а).

Анализ проводили для случая, при котором величина адгезии, R_a , матричного материала к поверхности заполнителей меньше его когезионной прочности, R_k , $R_a < R_k$.

Изменение формы заполнителя изменяет распределение деформаций в матричном материале (рис. 4.2 б, в).

Сравнение модели с заполнителями в форме квадрата (рис. 4.2.в) сравнивалось с распределением деформаций в модели с заполнителями в форме диска.

Анализ показал, что при изменении формы заполнителя изменяется характер распределения деформаций затвердевшего матричного материала. Особенно заметно влияние формы заполнителей на градиенты деформаций при изменении ориентирования заполнителей друг относительно друга (рис. 4.3).

Нарушение симметрии в макроструктуре за счет изменения ориентирования заполнителей в форме квадрата вызывает несимметричное распределение собственных деформаций на уровне структурной неоднородности.

Распределение собственных деформаций и их градиентов в твердеющем матричном композите зависит от количества заполнителей, что определяет расстояние между ними, формы заполнителей и их ориентирования друг относительно друга. Влияние формы и взаимной ориентации заполнителей столь существенны, что это может привести к изменению характера распределения технологических деформаций в каждой структурно повторяющейся ячейке. Структурная ячейка включает в себя группу заполнителей, определенным образом распределенных в матричном материале. Предполагается, что характеристики ячеек инвариантны, что обеспечивает инвариантность свойств, включая распределения собственных деформаций матричного материала. Поэтому бетон, как грубогетерогенный матричный композит, представляется, как правило, в виде набора одинаковых по свойствам и параметрам структурных ячеек. В связи с этим принятые модели макроструктуры включают заполнители одинаковой формы. Выявленные закономерности с применением одного заполнителя или их группы автоматически переносились на всю систему. Наш анализ показал, что в случае изменения ориентирования заполнителей, форма которых отличается от круга для плоских моделей (шара для пространственных моделей) изменяется характер распределения собственных деформации в твердеющем матричном материале. Это ведет к индивидуальным особенностям формирования макроструктуры бетона как набора структурных ячеек. Еще больше проявляется индивидуальность каждой структурной ячейки в случаях изменения уровня адгезии матричного материала к заполнителям и в случае изменения рельефа поверхности заполнителей.

На рис. 4.5. представлены интегральные и локальные деформации, возникающие при твердении матричного материала, для случая $R_a < R_k$.

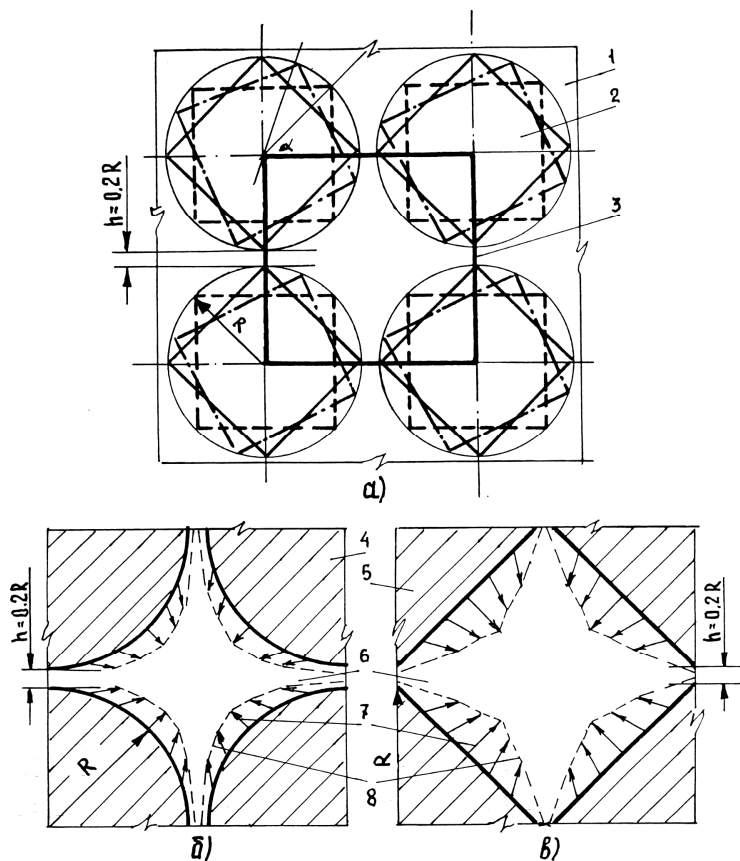


Рис.4.2. Влияние формы заполнителя на распределение усадочных деформаций в матрице.

а – геометрические характеристики модели структурной ячейки бетона; **б** – модель с заполнителями в форме круга; **в** – модель с квадратными заполнителями. 1 – матрица; 2 – заполнители; 3 – элементарная структурная ячейка; 4 – заполнители в форме круга; 5 – заполнители в форме квадрата; 6 – матрица; 7 – направление деформаций; 8 – эпюра деформаций.

Как на уровне структурной ячейки, так и на уровне ВПР возникают градиенты деформаций по величине и направлению. Интегральные деформации распределены достаточно равномерно по сравнению с локальными деформациями на ВПР. Изменение рельефа поверхности каждого заполнителя вызывает

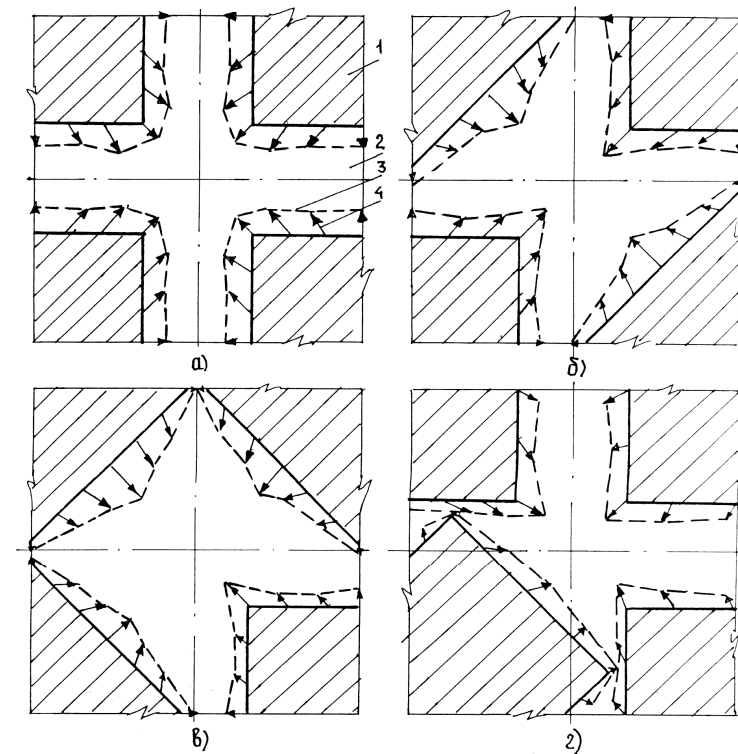


Рис. 4.3. Влияние ориентирования заполнителей на распределение усадочных деформаций.

а, б, в, г – способы ориентирования заполнителей; 1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – эпюры деформаций; 4 – направление деформаций.

изменение локальных деформаций. Обращает на себя внимание разнонаправленность деформаций на микронеровностях поверхности.

Для подтверждения индивидуального формирования каждой структурной ячейки и существования в каждой из них интегральных и локальных остаточных деформаций были изготовлены физические модели бетона с заполнителем в виде гравия и дробленного гранитного щебня. В качестве матричного материала использовали эпоксидную смолу типа ЭД-16 (отвердители ПЭПА, соотношение 10:1 по объему), которая обладает оптической анизотропией. Применение методов фотоупругости позволяет получить качественную картину распределения остаточных деформаций на уровне структурных ячеек бетона.

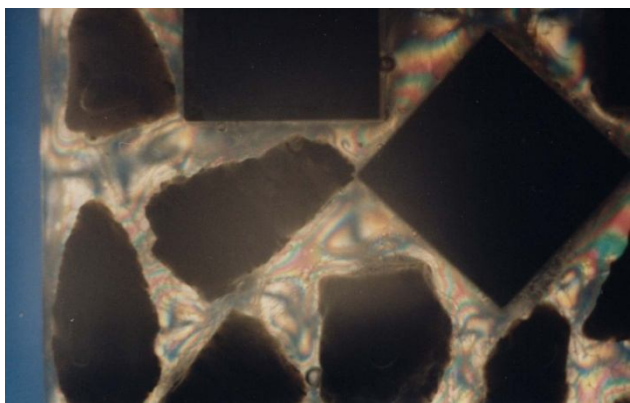
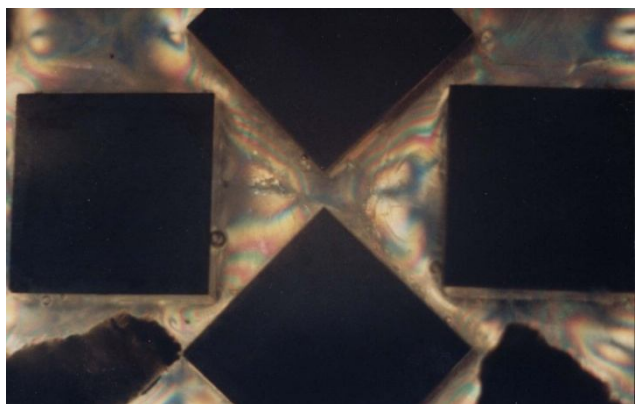
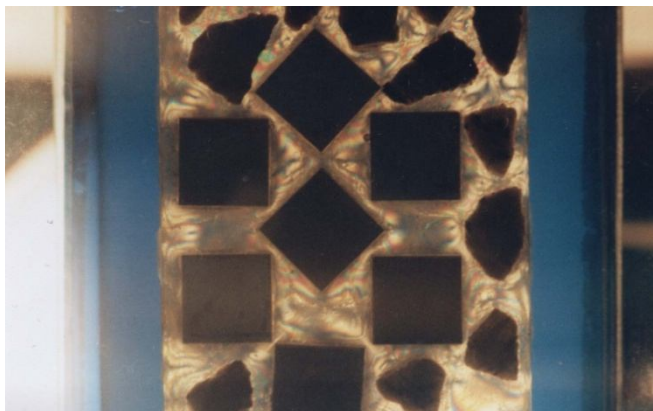


Рис. 4.4. Характер распределения остаточных деформаций в моделях структуры бетона.

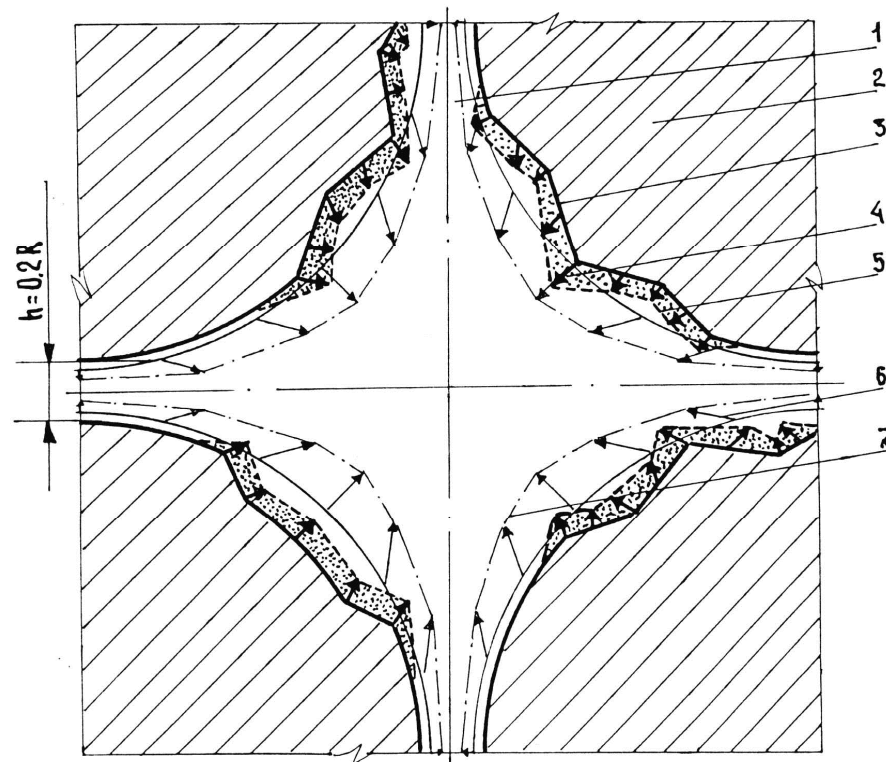


Рис. 4.5. Влияние рельефа поверхности заполнителей на характер распределения усадочных деформаций.

1 – матрица; 2 – заполнители; 3 – рельеф поверхностей заполнителей; 4 – направление локальных деформаций; 5 – эпюры локальных деформаций; 6 – направление интегральных деформаций; 7 – эпюра интегральных деформаций.

Картини распределения остаточных деформаций в моделях бетона на гравии и щебне представлены на рис. 4.6.

Анализ показал, что вне зависимости от вида заполнителя в каждой выделенной структурной ячейке присутствуют интегральные и локальные поля остаточных деформаций. В моделях с применением в качестве заполнителя гравия, поля интегральных деформаций распределены более равномерно по сравнению с заполнителями неправильной формы. Микрорельеф заполнителей создает локальные поля остаточных деформаций.

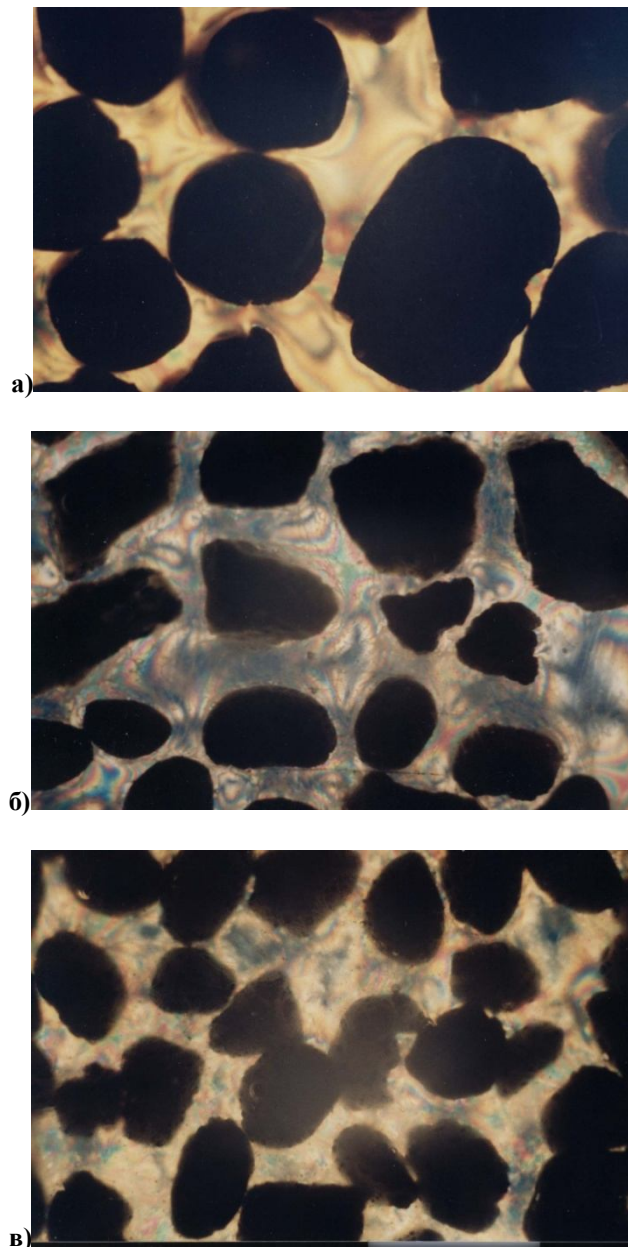


Рис. 4.6. Характер распределения остаточных деформаций в моделях бетона. **а** – заполнитель в виде гравия; **б** – заполнитель-щебень; **в** – распределение локальных и интегральных деформаций.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что в бетоне как грубогетерогенном матричном композите в результате взаимодействия твердеющего матричного материала с заполнителями произвольной формы и ориентирования на уровне макроструктуры возникают и развиваются остаточные неравномерно распределенные интегральные и локальные деформации. Характер распределения деформаций и их градиентов зависят от ВПР между матрицей и заполнителями, которая образуется в момент получения бетонной смеси. Характер распределения остаточных деформаций определяет состояние макроструктур бетона и, тем самым, ее способность воспринимать и перераспределять деформации, возникающие под действием эксплуатационных нагрузок.

Градиенты собственных деформаций в твердеющем матричном материале могут привести к зарождению и развитию технологических трещин. Под технологическими трещинами понимают трещины, которые возникают в материале в периоды его получения и технологической переработки в изделия и которые присутствуют в структуре материала до приложения к нему эксплуатационных нагрузок.

Основной причиной образования технологических трещин на уровне структурной неоднородности типа "матрица - заполнители" являются градиенты объемных деформаций, возникающих при взаимодействии твердеющего матричного материала с заполнителями. В свою очередь, градиенты деформаций определяются количеством заполнителей и их ориентированием (геометрическими параметрами макроструктуры) и соотношением адгезионной и когезионной прочностей на ВПР.

Наши исследования позволяют к перечисленным факторам, добавить форму заполнителей и рельеф их поверхностей. Форма заполнителей и их ориентирование ведут к индивидуальному формированию каждой структурной ячейки, в которой индивидуальное состояние усиливается несхожестью рельефов поверхности заполнителей. Локальные деформации могут также служить источником зарождения трещин и определять место появления несплошности. Дальнейшее укрупнение трещин происходит под действием градиентов интегральных деформаций. Можно заключить, что причинами зарождения и развития технологических трещин являются градиенты интегральных и локальных деформаций, которые зависят от геометрических характеристик макроструктуры – количества, формы, ориентирования и рельефа поверхности заполнителей.

К важным факторам, определяющим характер распределения трещин в макроструктуре, относят уровень адгезионных связей между матрицей и заполнителями. Многие исследователи отмечают влияние адгезии растворной части к заполнителям на прочностные и деформативные характеристики. Предлагаются технологические способы изменения состояния поверхности заполнителей, ко-

торые позволяют изменять взаимовлияние на формирование ВПР. В общем случае предлагается три варианта возможного соотношения адгезионной и когезионной прочностей ($R_a < R_k$; $R_a > R_k$; $R_a = R_k$), от которых зависят механизм зарождения и характер распределения технологических трещин [].

Принимая как факт наличие технологических трещин в бетоне, в наших опытах проводился анализ шлифов бетона с целью обнаружения и изучения характера распределения трещин в обычном тяжелом бетоне М300. Состав бетона:

$\text{Ц} = 320 \text{ кг/м}^3$; $\text{Щ} = 1362 \text{ кг/м}^3$; $\text{П} = 583 \text{ кг/м}^3$; $\text{В/Ц} = 0,5$.

При анализе исходили из предположения, что в случае применения обычных мытых крупных и мелких заполнителей реализуется избирательный характер адгезии матричного материала к заполнителям, характерный при $R_a = R_k$.

На фотографиях шлифов бетона крупные и мелкие заполнители и трещины пропускают проходящий свет. Цементный камень представлен темной, не пропускающей свет массой (рис. 4.7).

Анализ показал, что на уровне макроструктуры присутствуют трещины сцепления (ТС) на границе раздела матричного материала с крупными и мелкими заполнителями; трещины, которые начинаются от трещин сцепления и развиваются в растворную часть (ТР), трещины в матрице, которые развиваются между заполнителями (ТМ) (рис. 4.8). На фотографиях выделены участки с изменением рельефа заполнителей, на которых возникают и развиваются технологические трещины (рис. 4.4, 4.5), что может быть подтверждением влияния локальных градиентов деформаций на появление технологических трещин.

Сравнение характера распределения трещин вокруг крупных и мелких заполнителей показало правильность утверждения, что процессы на уровне "растворная часть - крупные заполнители" и "цементный камень - мелкие заполнители" качественно сходны. На фотографии (рис. 4.8) видно, что ширина раскрытия трещин в цементном камне, которые возникли под действием мелких заполнителей в 5...10 раз меньше по сравнению с шириной раскрытия трещин в растворной части.

Можно выделить трещины в матричном материале, которые начинают развиваться и заканчивают свое развитие на берегах других трещин. Присутствуют трещины, незавершенные в своем развитии, как на уровне растворной части, так и на уровне цементного камня. Независимо от уровня трещин в матричном материале характерно их развитие по микроизвилистым траекториям. В растворной части при встрече трещины этого уровня с мелкими заполнителями она их огибает. Не исключено, что такие трещины, попадая в зону микродеформаций, создаваемым мелкими заполнителями, изменяют направление движения. Возможен вариант их саморазвития путем прорастания и слияния с трещинами на уровне цементного камня.

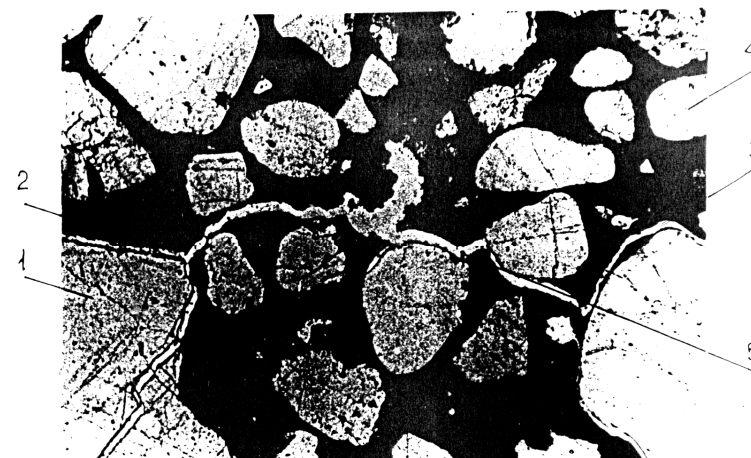
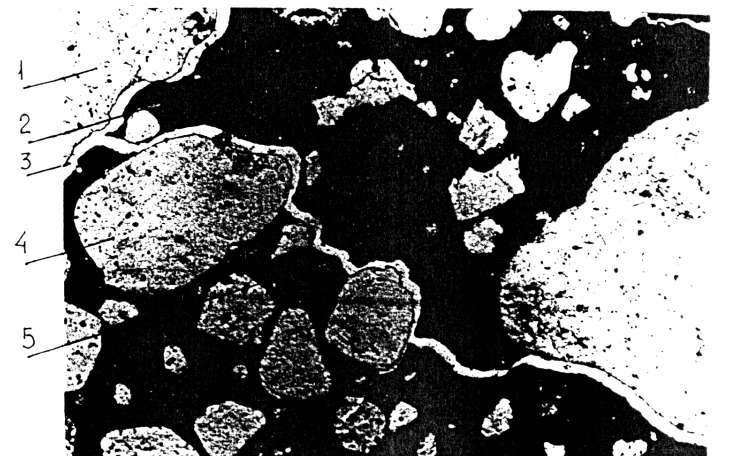


Рис. 4.7. Характер распределения структурных элементов в бетоне.

1 – крупный заполнитель; 2 – матрица; 3 – ВПР; 4 – мелкий заполнитель; 5 – технологическая трещина.

По аналогии с распределением трещин в микроструктуре, в макроструктуре трещины незавершенные в своем развитии можно отнести к технологическим трещинам, а трещины, которые замыкаются на берегах других трещин следует классифицировать как ВПР.

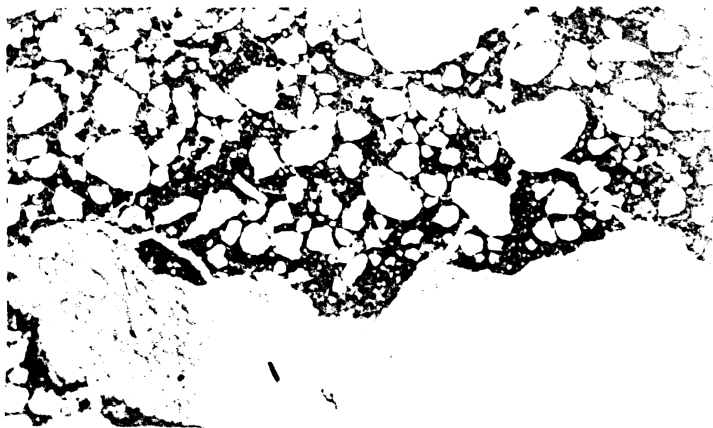
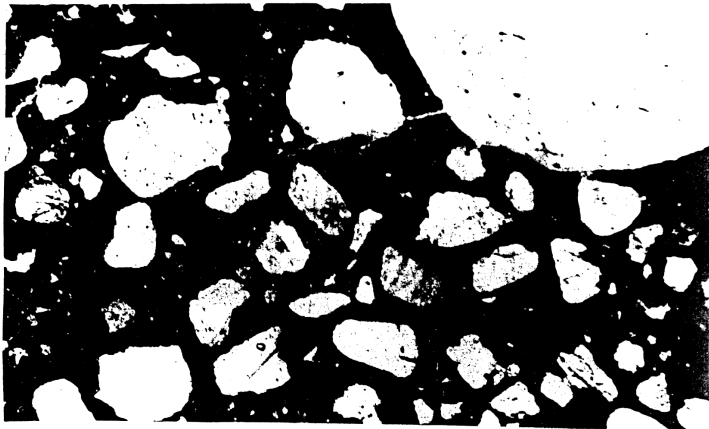


Рис. 4.8. Характер распределения трещин в структуре бетона.

Проведенные исследования механизмов формирования макроструктуры бетонов показали, что причинами зарождения и развития несплошностей в твердеющем матричном материале, которые вырождаются в ВПР или технологические трещины являются градиенты деформаций, зависящие от:

- геометрических особенностей макроструктуры, которые выражаются через количество, форму, ориентирование и рельеф поверхности крупных и мелких заполнителей;

- адгезионно-когезионных сил связи на границе раздела твердеющего матричного материала и заполнителей.

В макроструктуре бетонов можно выделить характерные типы ВПР и технологических трещин:

- трещины сцепления, которые могут происходить по всей поверхности заполнителей и которые можно представить как ВПР и трещины сцепления, которые проходят только по отдельным участкам поверхности;

- трещины в матричном материале, которые начинают свое развитие с берегов трещин сцепления (ВПР) и развиваются в периферийные области матрицы (в случае, если они замыкаются на берегах других трещин, их следует трактовать как ВПР);

- трещины в матричном материале, которые появляются между рядом расположенными заполнителями и которые могут замыкаться на берегах других трещин (ВПР) или быть незавершенными в своем развитии.

Суммарные количества ВПР и технологических трещин определяют гетерогенность макроструктуры и, в зависимости от внешних воздействий, ее способность воспринимать и перераспределять возникающие возмущения без изменения своего функционального назначения. Наличие технологических трещин, незавершенных в своем развитии и поля остаточных деформаций создают предпосылки внутреннего комфортного переустройства с переходом от трещины как концентратора напряжений к ВПР как диссипатора энергии с сохранением заданных свойств в требуемом диапазоне.

4.3. Характер распределения ВПР и технологических трещин в бетонах как полиструктурных материалах

Бетон, как материал, организованный по типу "структура в структуре", обретает свою целостность и приобретает определенный набор свойств, благодаря сосуществованию различных уровней структурных неоднородностей. Проведенные исследования и анализ показали, что на каждом выделенном уровне структурных неоднородностей реализуется свой механизм спонтанного структурообразования. При этом качественно несхожие механизмы организации структур приводят к образованию сходных структурных параметров - ВПР и технологических трещин. ВПР различных типов и технологические трещины определяют гетерогенность отдельных структурных неоднородностей и, наряду с другими структурными составляющими, гетерогенность всего материала. Заполнители и матричный материал можно отнести к исходным составляющим бетона. Остальные структурные элементы формируются в период твердения вяжущего и определяются составами матричного материала и заполнителей. Таким образом,

ВПП и технологические трещины, можно отнести к приобретенным структурным элементам, вид и характер распределения которых определяет в дальнейшем способность материала адекватно вписываться в разнообразные условия эксплуатации. В данном случае под адекватностью поведения сложноорганизованных материалов понимается способность отдельных подструктур и структурных элементов воспринимать и перераспределять внешние воздействия при общем сохранении функциональных свойств материала в целом. Это предполагает общее равноправие и равнозначность структурных неоднородностей при приоритетном включении в работу в зависимости от вида и уровня эксплуатационных нагрузок.

Для качественной оценки роли тех или иных элементов структуры в поведении полиструктурного материала возникла необходимость разработки модели структуры бетона. При разработке модели бетона исходили из априорной информации о существовании на всех уровнях структурных неоднородностей несплошностей в виде ВПП и технологических трещин. Дефекты и несовершенства, привнесенные в бетон заполнителями не рассматривались. Не анализируются процессы, связанные с организацией структур продуктов новообразований в предположении, что вне масштабного фактора происходит образование дискретных структур. Об этом свидетельствуют работы Юнга о представлении цементного камня как неоднородной композиции, что позволило ему ввести его представление как "микробетона" и специалистов в области физической химии, которые, вне зависимости от механизма протекания реакций гидратации отмечают появление зародышей с последующим ростом кристаллических образований, дискретных по своей сути.

Анализ структуры бетона, как материала, организованного по принципу "структура в структуре" позволил выделить в качестве важного структурного параметра ВПП, образующиеся на различных уровнях структурных неоднородностей. Независимо от побудительных причин образования и масштабного уровня ВПП обладают общими признаками, к которым можно отнести: - разделение материала на отдельные фрагменты путем образования несплошностей или слоев модифицированного материала, свойства которого отличаются от свойств материала в объеме; - способность воспринимать нагрузки и деформации, вызванные как внешними воздействиями, так и внутренними процессами, которые передаются от фрагмента к фрагменту; - способность перераспределять деформации между фрагментами; - являются одним из важных источников внутреннего и внешнего тепломассообмена.

ВПП в виде несплошностей образуется не сразу в структуре материала. Начало их образования можно отнести к образованию зародышевых технологических трещин. Как показано в [] берега таких трещин, как своеобразные ВПП,

воспринимают объемные деформации, которые развиваются в твердеющем вяжущем. Это ведет к увеличению ширины раскрытия трещин, накоплению предельных пластических деформаций и скачкообразному прорастанию трещин до следующих мест задержки. При этом происходит увеличение площади поверхности берегов трещин, что способствует восприятию больших деформаций и их градиентов, что ведет к проявлению явлений формоизменений противоположных берегов, дальнейшее увеличение ширины раскрытия и очередного прорыва мест задержки. При стабилизации собственных деформаций материала трещины могут стабилизироваться в структуре и перейти в ранг технологических трещин. В случае прорастания трещины до пересечения с берегами другой трещины, ее функции как концентратора напряжений теряются, и она превращается в ВПП с комплексом перечисленных выше признаков. Таким образом, ВПП являются законченными в своем развитии технологическими трещинами. Часть ВПП способны заполняться продуктами новообразований с протеканием известных явлений "самозалечивания". При этом они не исчезают как ВПП, а переходят от ВПП типа несплошностей к ВПП типа модифицированных слоев. В предлагаемой модели структуры бетона мы ограничимся представлением ВПП как несплошностей, которые сохранились на выделенных уровнях структурных неоднородностей. Характерно, что ВПП на данном уровне структурной неоднородности соизмерима с самой структурной неоднородностью. ВПП, возникшие на более высоком уровне неоднородностей, пронизывают структуру более низких уровней структурных неоднородностей. На их берегах выклиниваются ВПП, образованные на этих уровнях структуры, образуя специфическую связную цепь ВПП, рис. 4.9.

В общем случае в модель структуры бетона включены ВПП, образованные в результате взаимодействия растворной части с крупными заполнителями (рис. 4.9а) и цементного камня с мелкими заполнителями (рис. 4.9б) и ВПП в виде межкластерных поверхностей раздела на уровне цементного камня (рис. 4.9в). При этом можно выделить ВПП на границе раздела матрицы с заполнителями и ВПП в матричном материале.

К технологическим трещинам можно отнести несплошности материала, образованные на любом уровне структурной неоднородности, которые можно охарактеризовать протяженностью, которая в несколько раз больше расстояния между противоположными плоскостями (берегами) и наличием одной или двух точек (линий) смыкания противоположных плоскостей (берегов). Отличительной способностью технологических трещин можно считать

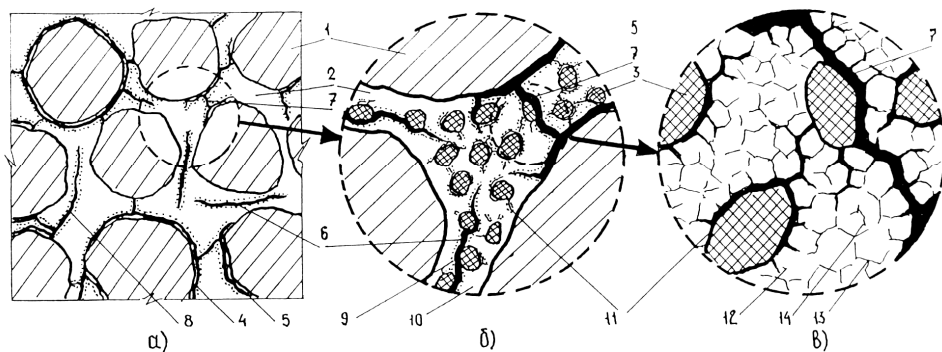


Рис. 4.9. Модель структуры бетона.

а – макроструктура; **б** – уровень растворная часть – крупный заполнитель; **в** – уровень цементный камень – мелкий заполнитель.

1 – крупный заполнитель; 2 – растворная часть; 3 – мелкий заполнитель; 4 – трещины сцепления по всей поверхности заполнителей; 5 – трещины сцепления, расположенные на отдельных участках поверхности заполнителей; 6 – трещины, расположенные между заполнителями; 7 – трещины, которые замыкаются на берегах других трещин; 8 – трещины, незавершенные в своем развитии; 9 – модифицированный поверхностный слой на ВПР и берегах трещин; 10 – цементный камень; 11 – трещины, возникшие в результате взаимодействия мелких заполнителей и цементного камня; 12 – структурные блоки цементного камня; 13 – межкластерные поверхности раздела; 14 – технологические трещины на уровне цементного камня.

микроизвилистый характер ее развития и несовпадения микрорельефов противоположных берегов одной и той же трещины. Эти особенности связаны с характером образования и развития в твердеющей системе с достаточно сложной структурной иерархией. Побудительной причиной образования зародышевых трещин являются объемные изменения, которые сопровождают твердение и структурообразование минеральных вяжущих. Можно предположить, что развиваясь по определенным зависимостям во всем объеме матричного материала, деформации одновременно инициируют принципиально разные механизмы образования зародышевых трещин (базовых несплошностей) в детерминированных местах. На уровнях структурной неоднородности "матрица - заполнители" место образования зародышевых трещин предопределяется геометрическими характеристиками макроструктуры и соотношением значений R_a и R_k . В случае $R_a < R_k$

зародышевые трещины образуются на границе раздела между матричным материалом и заполнителями с последующим преимущественным прорастанием на этой границе раздела. Для ситуации, характерной для $R_a > R_k$, зародышевые трещины появляются в матричном материале между заполнителями. Последующая траектория таких трещин предопределена структурными особенностями матричного материала. Конкретное место появления трещины в макроструктуре и микротраектория ее развития связаны с образованием межкластерных поверхностей раздела различного масштабного уровня, которые, при продолжающихся объемных изменениях, способны трансформироваться в технологические трещины или ВПР, характерные для данного уровня структурной неоднородности. Технологические трещины не являются результатом собственного роста за счет концентрации предельных пластических деформаций у своего устья (деформационный подход) или за счет концентрации энергии у своего устья (энергетический подход). Поверхности раздела, которые возникают в результате организации структуры сложносоставленных материалов, можно трактовать как технологические трещины только после завершения интенсивных начальных процессов перераспределения массы и качественного состава материала по своим структурным нишам. Можно предположить, что эти процессы реализуются на всех уровнях структурных неоднородностей, взаимовлияя и взаимодействуя друг с другом. При этом случаи провокации образования поверхностей раздела со значительной площадью поверхности исходят из нижнего уровня неоднородностей, являющимся основным источником развития объемных деформаций. В случаях, если межкластерные поверхности раздела не в состоянии рассеивать объемные деформации, происходят кластер-кластерные взаимодействия с образованием достаточно больших ВПР, появление которых вызывает внутреннюю диссипацию энергии деформаций и которая фиксируется в структуре готового материала в виде ВПР и технологических трещин. Можно предположить, что в случаях полиструктурной организации материала, объемные деформации, переходя на более высокий уровень структурной неоднородности, ведут к появлению значительных площадей поверхностей раздела. Место и вид этих площадей определяются особенностями этого уровня структурных неоднородностей и они автоматически входят составной частью в структуру на уровне взаимодействия цементного камня с мелкими заполнителями (рис. 4.9б) и на уровне самого цементного камня (рис. 4.9в). В модели представлены технологические трещины, которые в процессе эволюции материала не выродились в поры и капилляры за счет явлений "самозалечивания".

Таким образом, в предлагаемой модели структуры бетона (рис. 4.9), в качестве основных элементов структуры представлены ВПР и технологические трещины, которые определенным образом расположены на различных условиях

структурных неоднородностей. Их вид и характер распределения предопределяется качественными характеристиками, количественными соотношениями и технологическими условиями переработки материала в изделия. В свою очередь, вид ВПР и технологических трещин и их ориентирование определяют способность материала воспринимать, без изменения уровня свойств, все разнообразие силовых и экологических воздействий на конструкцию. Роль ВПР сводится к распределению между отдельными компонентами и структурами внешних воздействий в предположении, что на каждый ВПР уровень этих воздействий должен рассеиваться и снижаться. Технологические трещины при этом могут подрастать, превращаясь при этом в эксплуатационные трещины. Так как траектория их развития предопределена дискретным строением различных уровней структурных неоднородностей, то, до определенного уровня воздействий, эксплуатационные трещины будут замыкаться на берегах технологических трещин или на ВПР. При этом энергия, необходимая для роста трещин рассеивается, что замедляет процессы разрушения. Замыкание трещин на берегах других трещин или ВПР переводит их во вновь образованные ВПР, при которых функции трещины как основного фактора деления материала на самостоятельные части теряются. Уровень свойств при этом не меняется, так как технологические трещины, превращаясь в эксплуатационные, развиваются в пределах одного структурного фрагмента. Дальнейшие нагрузки будут вызывать слияние ВПР и трещин различных структурных фрагментов по достаточно сложным траекториям, которые зависят от начального дискретного строения каждого уровня структурной неоднородности. После слияния ВПР до размера магистральной трещины может наблюдаться ее необратимый рост до полного разделения материала в конструкции на части разрушения.

В силу того, что кинетика разрушения материала конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях, в значительной степени определяется видом и характером распределения ВПР и технологических трещин на различных уровнях структурных неоднородностей бетона как полиструктурного материала, то было выдвинуто предположение, что изменяя основные параметры исходных структурных элементов в предложенной модели структуры бетона, можно более полно использовать ресурс материала за счет изменения кинетики его разрушения.

В качестве основных факторов, которые позволяют изменять вид и характер ВПР, и технологических трещин приняты форма и минералогический состав крупных заполнителей. Изменение этих элементов позволит получать бетоны с различными типами структурных параметров на уровне макроструктуры, представленной неоднородностью "растворная часть - крупные заполнители". Изменение геометрических характеристик макроструктуры предполагается проводить

за счет изменения количества мелкого заполнителя. Наряду с качественными характеристиками заполнителей добавляется достаточно существенный фактор, который позволяет изменять распределение ВПР и технологических трещин за счет изменения расстояния между крупными заполнителями. Кроме того, изменение количества мелкого заполнителя ведет к изменению распределения ВПР и технологических трещин на уровне структурной неоднородности типа "цементный камень - мелкий заполнитель".

Таким образом, проведенный анализ позволил предложить модель структуры бетона, которая включает в себя ВПР и технологические трещины различных видов и характеров расположения. Выделение ВПР и технологических трещин в самостоятельные структурные элементы связано с их способностью в значительной степени предопределять сохранение стабильности свойств материала при изменяющихся условиях его работы. Анализ позволил наметить пути получения бетонов с регулируемым структурными элементами с целью повышения его стойкости в экстремальных условиях эксплуатации.

Анализ структуры бетона как гетерогенного материала позволил отнести к структурным элементам, изменение которых в процессе эксплуатации может привести к потере функциональных свойств. Рассмотрены следующие элементы структуры: - локальные и интегральные поля остаточных деформаций как состояния отдельных структурных неоднородностей, так и всей структуры; - ВПР на границе раздела матрицы и заполнителей; - ВПР между отдельными структурными неоднородностями различных масштабных уровней; - ВПР как берега технологических трещин; - технологические трещины на разных уровнях структурных неоднородностей.

Механизм формирования макроструктуры бетона, как показали исследования, определяется ее геометрическими характеристиками – количеством и качественным составом заполнителей и уровнем взаимодействия твердеющего матричного материала с заполнителями. При этом особенно отмечается индивидуальный характер распределения локальных и интегральных остаточных (технологических, начальных, наследственных) деформаций в каждой структурной ячейке, что связано с индивидуальностью формы и рельефа поверхности каждого зерна заполнителя. Градиентом деформаций, которые возникают и сопровождают твердение матричного материала, вызывают появление и развитие в нем несплошностей, которые относятся к внутренним поверхностям раздела и к технологическим трещинам. Несмотря на индивидуальность каждой структурной ячейки бетона можно выделить, как показал анализ, характерные виды ВПР и технологических трещин, типичные для данной структуры. Суммарные количества ВПР и технологических трещин определяют гетерогенность макроструктуры

ры и ее способность видоизменяться без изменения функционального назначения при действии внешних эксплуатационных нагрузок.

Анализ структуры бетона как грубогетерогенного материала и механизмов структурообразования на микро- и макро уровнях позволил предложить модель структуры бетона, в которую, кроме заполнителей, матричного материала, модифицированного слоя на границе раздела матрицы и заполнителей, пор и капилляров, включены в качестве элементов структуры такие элементы как технологические трещины и ВПР. В свою очередь технологические трещины и ВПР классифицированы по масштабному признаку, по месту возникновения и направлению развития. Проведенный анализ позволил наметить технологические пути получения бетонов с регулируемыми выделенными структурными элементами с целью повышения его стойкости при различных режимах эксплуатации.

"Нет розы без шипов; чистейший ключ
Мутят песчинки; солнце и луну
Скрывает тень затмения или туч"
(В.Шекспир. Сонет №35)

5. МЕХАНИЗМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ

5.1. Механизм усадки образцов из композиционных строительных материалов

Вопросам изучения усадки КСМ и причин ее возникновения посвящено много работ [39, 40, 43...48]. Представляет интерес механизм развития и распределения усадочных деформаций в образцах конечных размеров, изготовленных из композитов полиструктурного строения.

Распределение усадочных деформаций рассмотрим на примере усадки образца размером $a \times a \times 4a$. Примем следующие допущения: - материал, из которого изготовлен образец, представляет собой непрерывную и изотропную среду; - усадка материала происходит без градиентов и сразу по всему объему; - все усадочные деформации проявляются на внешних поверхностях образца; - при усадке материала не возникают трещины; - при затвердевании материала он постепенно переходит из пластичного в упругое состояние; - в пластичном состоянии материал способен деформироваться без нарушения целостности; - поверхности образца способны свободно перемещаться (отсутствуют пристеночные эффекты).

Выделим плоскость А, В, С, D, проходящую через центр тяжести образца и делящую его на две симметричные части сечением $4a \times a$, рис. 5.1.

Исходя из принятых условий, все усадочные деформации проявляются на внешних поверхностях образца, рассмотрим возможное перемещение точек А, N и К. На примере точки А рассмотрим определение направления ее перемещения и относительной величины возможной деформации. Точка А взаимодействует при усадке материала со всеми точками, лежащими на линиях АВ, ВС, CD и AD. В данном случае ограничимся анализом перемещений в плоском сечении. Построим равнодействующие возможных перемещений при взаимодействии точки с выделенными линиями (ВС, CD), после чего построим суммирующую равнодействующую, показывающую направление перемещений и относительную величину деформаций. Приняв определенный масштаб (одинаковый для всех выделенных точек), отложим вектор усадочных деформаций. Аналогично

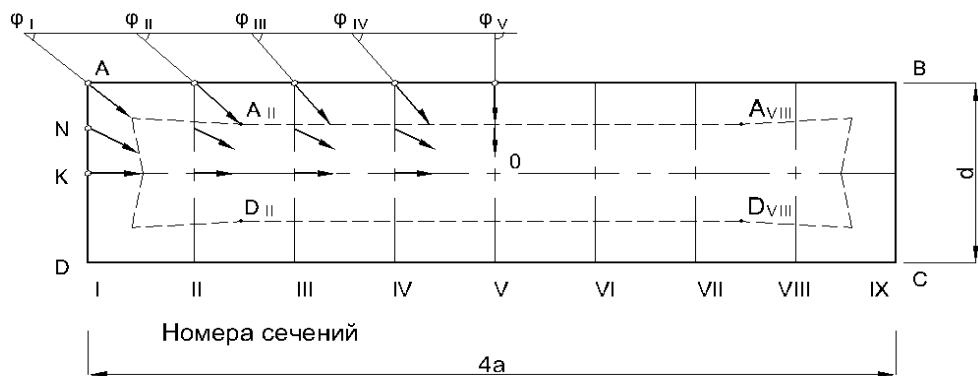


Рис. 5.1. Распределение деформаций усадки по величине (ε) и направлению (φ) в сечении образца размером $a \times a \times 4a$.

построим векторы возможных деформаций для точек K, N и точек, расположенных внутри сечения (рис. 5.1). В результате получим эпюру усадочных деформаций в сечении II, III, IV, V образца, претерпевающего равномерную усадку.

Анализ распределения усадочных деформаций отдельных точек сечения показывает, что даже при условиях равномерной усадки, разноудаленность взаимодействующих точек из-за геометрических параметров образца приводит к возникновению градиентов усадки по величине $\Delta\varepsilon$ и направлению $\Delta\varphi$.

В общем случае распределение усадочных деформаций в образце размером $a \times a \times 4a$ может быть определено из зависимости

$$\varepsilon_i = k\varepsilon_c \cos \varphi, \quad (5.1)$$

где ε_c - величина усадки, определенная стандартными методами,

ε_i - искомая величина усадки, k - коэффициент, учитывающий изменение усадки по сечению образца и изменяющийся от 0,26 до 1,0, φ - угол, определяющий направление перемещения точек относительно оси X.

Опыты, проведенные на моделях, а также на различных материалах (глине с различным водоглиняным отношением, цементном тесте и камне с различными В/Ц, полиэфирной и эпоксидной смолами) показали, что распределение усадочных деформаций в реальных образцах адекватно описывается предложенным графоаналитическим методом. На рис. 5.2 приведено распределение усадочных деформаций образца размером $4 \times 4 \times 16$ см, изготовленного из глины Орловского месторождения с $В/Г = 0,65$.

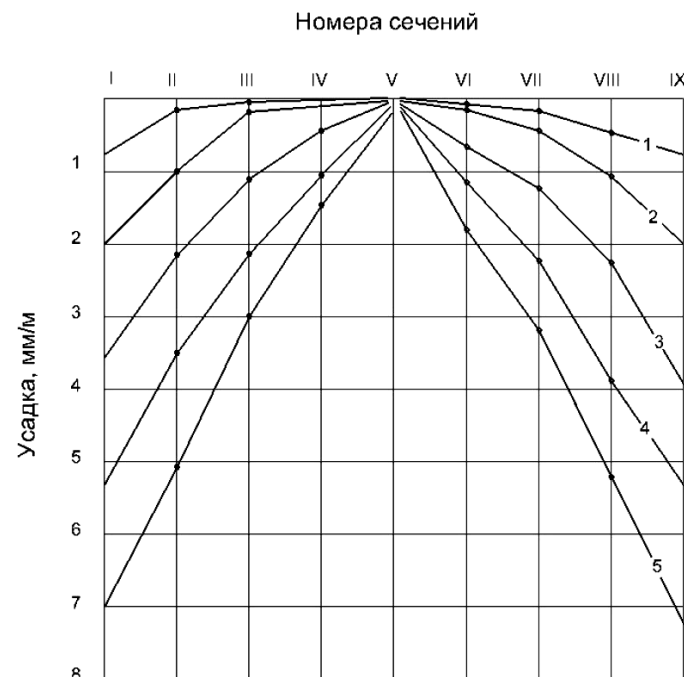


Рис. 5.2. Деформации усадки образца из глины при его высыхании. 1...5 – усадка образца в различные периоды сушки $t_1 \dots t_5$, при $t_5 > t_1$.

Перемещение точек I... IX, (рис. 5.2) при высыхании глины контролировалось измерительным микроскопом УИМ-21 с точностью до 1мкм.

Нелинейный характер усадочных деформаций в начальные периоды высыхания глиняных образцов рассмотрен ниже (кривые 1, 2, 3, рис. 5.2).

Так как деформации усадки протекают в твердеющем материале, то возникшие градиенты вызывают необратимое изменение формы образцов. Форма образца повторяет эпюру усадочных деформаций. Продолжающиеся объемные деформации проявляются на поверхностях, изменивших свою форму. Это ведет к перераспределению усадочных деформаций в образце. В точках максимального изменения формы (A^{II} , A^{VIII} , D^{VIII} , D^{II} рис. 5.1) концентрируются деформации разного направления и величины. Такие точки, при превышении локализованных пластических деформаций предельного значения, могут служить местом появления зародышевой трещины.

Предложенный графоаналитический метод изучения распределения усадочных деформаций, а также изучения кинетики усадки при изменении формы образца может быть рекомендован для образцов и изделий практически любой

геометрической формы. Следует учитывать непрерывный характер распределения усадочных деформаций. Это позволит проектировать композитные конструкции, в которых будут сведены к минимуму участки или зоны разновеликих и разнонаправленных усадочных деформаций. Особенно важно устранение опасных градиентов усадки для конструкций, эксплуатируемых в условиях переменного воздействия среды (увлажнение и высушивание, нагревание и охлаждение, замораживание и оттаивание). Если по конструктивным признакам нельзя изменить форму конструкции, то опасные участки необходимо дополнительно усилить арматурой.

Проведенный анализ показал, что распределение усадочных деформаций и их относительная величина определяются геометрическими параметрами композитного образца или конструкции. Поэтому, по нашему мнению, при проектировании композитных конструкций необходимо учитывать распределение собственных деформаций усадки как при технологической переработке материала в изделия, так и при их эксплуатации, что должно повысить трещиностойкость и эксплуатационную надежность.

5.2. Влияние гетерогенности среды на распределение усадочных деформаций

Усадочные деформации проявляются как на внешних, так и на внутренних поверхностях раздела КСМ. К внутренним поверхностям раздела можно отнести межкластерные ПР на всех масштабных уровнях, границы раздела матричного материала с наполнителями, межфазные границы раздела и берега зародышевых трещин.

Индивидуальные усадочные деформации кластеров при структурообразовании ненаполненных и наполненных систем проявляются на межкластерных ПР и неаддитивно определяют общую усадку образцов. Этим можно объяснить нелинейное распределение деформаций усадки по длине на начальных этапах структурообразования (кривые 1, 2, 3 рис. 5.2).

Появление зародышевых трещин в местах концентрации разнонаправленных усадочных деформаций и напряжений сдвига (A^{II} , A^{VIII} , D^{VIII} , D^{II} рис. 5.1) полностью изменяет распределение деформаций в образце. Рассмотрим распределение усадочных деформаций в образце с трещиной. Трещина расположена на расстоянии a от торца образца. Длина трещины составляет $a/2$ (рис. 5.3).

Берега трещины воспринимают усадочные деформации материала, что изменяет общее распределение деформаций не только по области трещины, но и во всем образце. В силу несимметричности расположения трещины на противо-

положных берегах возникают деформации усадки, различные по величине и направлению. Разнонаправленность усадочных деформаций вызывает раскрытие

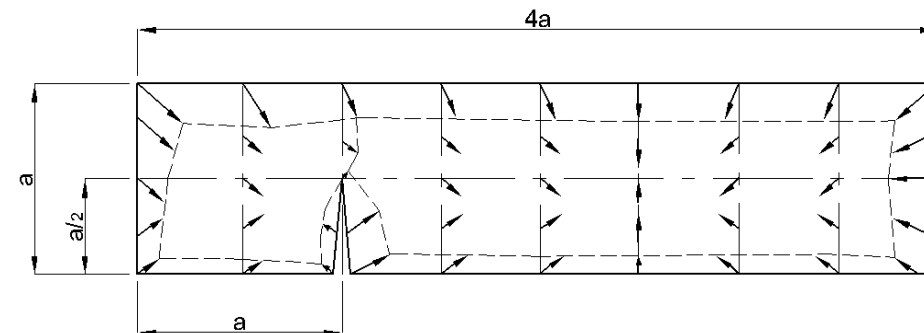


Рис. 5.3. Распределение усадочных деформаций в образце с трещиной.

1 – трещина; 2 – направление усадочных деформаций.

трещины и ее продвижение в материале. При этом происходит необратимое деформирование каждого берега с индивидуальным изменением микрорельефа. Поэтому, даже при деформациях противоположного знака, полное смыкание берегов трещины не происходит.

Экспериментальные результаты, показали, что усадка образца с трещинами меньше усадки образца без трещин на величину раскрытия трещин. В общем случае усадку образцов с трещинами можно определить по формуле

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_{\text{с}} + \sum_{i=1}^n b_i \quad (5.2)$$

где $\varepsilon_{\text{общ}}$ - общая усадка образца с трещинами; $\varepsilon_{\text{с}}$ - усадка, определяемая стандартными методами; b - ширина раскрытия трещины; n - количество трещин, расположенных в плоскостях, перпендикулярных оси образца, по которой определяют усадку.

Предложенная зависимость позволяет определить интегральную ширину раскрытия трещин по разности деформаций усадок образцов без трещин ε' и образцов с трещинами ε_T :

$$\sum_{i=1}^n b_i = \varepsilon' - \varepsilon_T \quad (5.3)$$

Таким образом, при исследовании рецептурно-технологических факторов на величину и интенсивность усадочных деформаций необходимо дополнительными методами (оптическими, методами звуковой эмиссии, электромагнитными, ультразвуковыми) определить количество, ориентирование и начальную ширину раскрытия трещин. В процессе исследования кинетики усадки ширина раскрытия трещин постоянно меняется, что позволяет корректировать величину усадки образца. Наши опыты, проведенные на модельных материалах и на об-

разцах из глины с различными В/Г, цементных композициях с различными В/Ц, желатине, полиэфирной смоле, парафине, водных дисперсиях

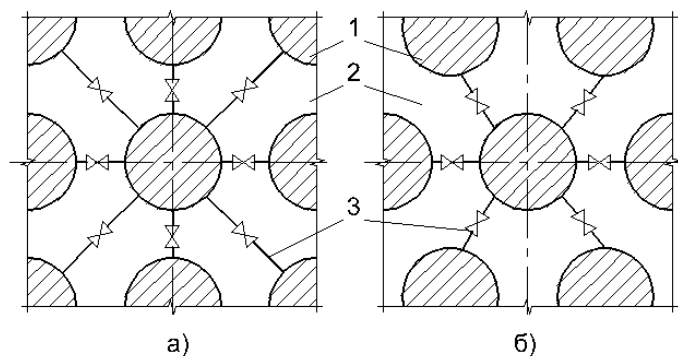


Рис. 5.4. Метастабильное состояние заполнителей при кубической (а) и гексагональной (б) упаковке при усадке матричного материала.

1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – усадочные деформации матричного материала.

тонкомолотых песка и кремнегеля, канифоли, на образцах различной длины с трещинами, специально образованными в материале, и образовавшимися в процессе усадки показали, что при учете суммарной ширины раскрытия трещин исчезает явление влияния масштабного фактора на удельную усадку. Неучет влияний трещин на общую усадку образцов может привести к ложным выводам о влиянии отдельных технологических факторов на величину усадки образцов из КСМ.

Более сложное влияние оказывает граница раздела матричного материала с заполнителями на величину усадки бетона как КМ. Заполнители распределены в бетоне достаточно равномерно. Это дает основание предположить, что заполнители находятся в метастабильном состоянии при взаимодействии с претерпевающей усадку матрицей (рис. 5.4).

Такое состояние характерно при превышении когезионной прочности матрицы R_k над ее адгезией к заполнителю R_A . Независимо от направления усадочных деформаций (при $R_A > R_k$ целостность границы раздела не нарушается) заполнители стремятся сохранить свое местоположение. Это связано с симметричностью воздействия на них деформаций усадки. Когезионно-адгезионные силы связи в матричном материале определяют появление новых ПР в бетоне или по границам раздела матрицы и заполнителей или в самом матричном материале.

Появление новых ПР ограничивает передачу усадочных деформаций на внешние ПР образцов из бетонов и ведет к увеличению ширины раскрытия внутренних ПР.

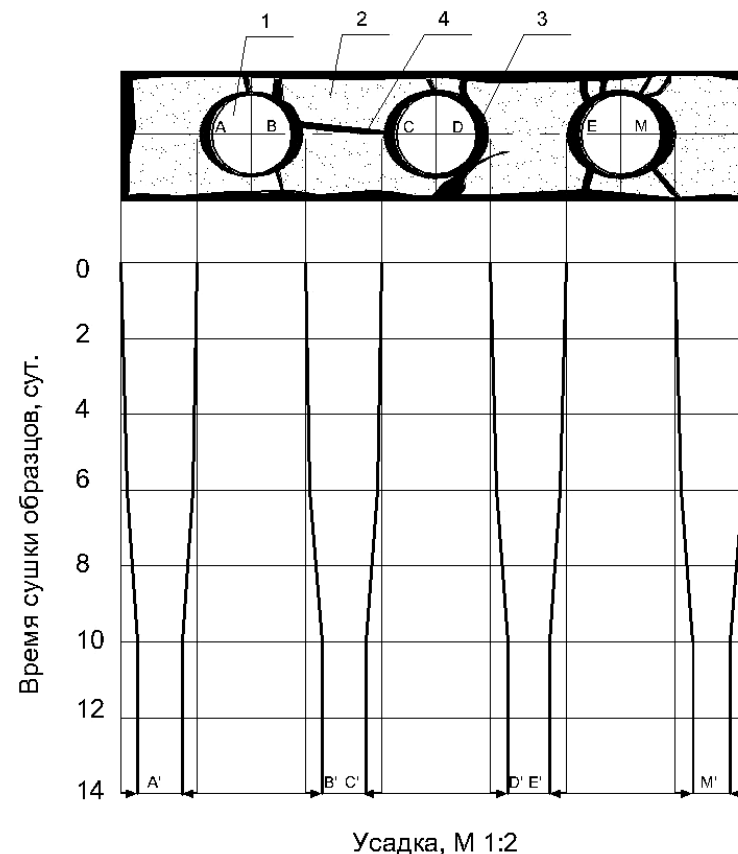


Рис. 5.5. Кинетика и характер усадочных деформаций в образце с заполнителями.

1 – заполнители; 2 – матрица; 3 – трещина на границе с заполнителями; 4 – трещины в матричном материале

Проведенные экспериментальные исследования с моделями структурных ячеек бетонов (матрица: глина, цементные композиции, парафин, эпоксидная и полиэфирная смолы) показали, что снижение усадки образцов размером 4 x 4 x 16 см с вставленными по оси заполнителями диаметром 24 мм и высотой 40 мм по сравнению с образцами без заполнителей кажущееся (рис. 5.5).

По нашему мнению, для бетонов справедливо определение общей усадки по зависимости $\varepsilon_c, \varepsilon_c + \sum \varepsilon_n$, где ε_k - ширина образовавшихся трещин по границе контакта матричного материала с заполнителями, n - количество контактных трещин. Количество контактных трещин может быть выражено через объемное содержание заполнителей.

Для образцов, изготовленных из бетонов, усадка $\varepsilon_{об}$ может быть определена через деформации усадки, определяемые стандартными методами ε_c , ширину и количество трещин в матричном материале ε_m и суммарное раскрытие контактных трещин ε_k .

Проведенный анализ механизмов распределения усадочных деформаций в гетерогенных средах показал, что распределение усадочных деформаций определяется геометрическими характеристиками образцов и конструкций из КСМ. Возникающие градиенты усадки по величине и направлению вызывают формирование твердеющих образцов и концентрацию разнонаправленных деформаций и напряжений сдвига. Установлено, что трещины полностью изменяют распределение усадочных деформаций в образце. Разное направление деформаций на противоположных берегах трещин вызывает их раскрытие и продвижение в образце. Для определения общей усадки необходимо учитывать количество и ширину раскрытия трещин. Поверхности раздела матричного материала с заполнителями воспринимают усадку матрицы и не передают ее полностью на внешние границы раздела образцов. При определении усадки образцов из бетонов необходимо учитывать ширину раскрытия и количество контактных трещин и ширину раскрытия и количество трещин в матричном материале.

"Уж если медь, гранит, земля и море
Не устоят, когда придет им срок... "
(В.Шекспир. Сонет № 65)

6. ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕЩИН ПЕРИОД СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

6.1. Механизм зарождения трещин в микроструктуре КСМ

Условия развития трещин в материалах, характеризующихся константами, принятыми в механике (линейной и нелинейной), изучает механика разрушения. Вопросами зарождения трещин в достаточно изотропных и упругих телах занимаются специалисты физики твердого тела и теории прочности. Зарождение трещин связывают, как правило, с перемещением и видоизменением дислокаций в реальном строении кристаллических решеток. Дислокационный механизм зарождения трещин достаточно надежно объясняет причины их появления на уровне межатомного и иногда межмолекулярного взаимодействий. В гетерогенных грубодисперсных материалах дислокационный механизм несомненно присутствует и играет свою роль на определенных уровнях структурных неоднородностей, но не может, по нашему мнению, объяснить зарождение трещины на уровне "частица - частица", "агрегат-агрегат" и "кластер в кластере - кластер в кластере". Гетерогенность таких структур локализует зародышевые трещины внутри самих себя с сохранением их потенциальной возможности в определенных условиях вырастать до опасных для данной структуры трещин.

Проведенный анализ показывает, что трещины присутствуют практически на всех структурных уровнях КСМ. Предложены классификации этих трещин в зависимости от размерных факторов и их "опасности" в материале. При этом отмечается, что зафиксированные трещины существуют в структуре материалов еще до приложения к ним эксплуатационных нагрузок. Так как каждая трещина не возникает сразу, предполагают определенную эволюцию от ее зарождения до роста. Причинами зарождения трещин специалисты считают собственные объемные деформации системы в целом и ее отдельных компонентов, различие температурных и влажностных деформаций составляющих материал, стесненные деформационные эффекты, температурные и влажностные градиенты, осмотические явления, коррозионные воздействия среды эксплуатации и др. При этом механизм зарождения трещин, как правило, не рассматривается. Поэтому была определена задача изучения механизма зарождения трещин в период структурообразования КСМ на неорганических вяжущих.

Под зародышевой трещиной понимают внутреннюю ПР, протяженность которой составляет ϵ_3 ЭСЭВ (для материалов, полученных методом прессования, зародышевая трещина соизмерима с уровнем неоднородности продуктов гидратации). Такое представление о зародышевой трещине обусловлено тем, что для уровня структурной неоднородности "кластер - кластер" появление внешней по отношению к агрегатам ПР связано с разрывом межчастичных связей соседних кластерных структур. При увеличении межкластерной ПР до размера самого агрегата превращает ее в опасную для данной структурной неоднородности трещину.

Механизм зарождения трещины целесообразно изучать на представительном объеме системы, в который входят как минимум два соседних кластера К-Н. Это связано с тем, что при кластер - кластерном взаимодействии самозарождаются (возникают) внутренние по отношению к системе поверхности.

Потенциальная способность к образованию зародышевой трещины закладывается в дисперсную систему на начальных этапах ее образования и определяется качественным составом и концентрацией частиц дисперсной фазы, соотношением поверхностных активностей между твердыми частицами и дисперсионной средой и между собой. В момент времени τ_1 происходит распределение рядовых частиц между своими "структурообразующими" и распределение К-1 по структурным блокам. Частицы приобретают момент движения, при этом для частиц соседних блоков направление перемещений не совпадает. Это вызывает увеличение расстояния между соседними агрегатами, что снижает величину F_c между частицами на поверхности соседних кластеров. Кроме того, последующие объемные деформации структурных агрегатов проявляются на поверхностях раздела, что изменяет протяженность и площадь межкластерных ПР. Нарушение связи (контактного перешейка) между частицами соседних кластеров критического размера ведет к самоизоляции кластерных структур и появлению свободных поверхностей. Эти поверхности можно рассматривать как зародышевые трещины. Появившиеся зародышевые трещины характеризуются длиной a , шириной раскрытия b и радиусом устья r_T .

Радиус устья r_T зависит от радиуса контактного перешейка. В нем можно различить границы раздела "твердое - жидкость" и "жидкость - газ", **рис. 6.1.а**. В устье зародышевой трещины действуют деформации растяжения ϵ_n , сдвиговые деформации ϵ_c , и капиллярные силы F_k . Действие такой системы деформаций и напряжений неоднозначно. Капиллярные силы стремятся уменьшить радиус устья зародышевой трещины и зависят от толщины адсорбированного слоя жидкости (его можно рассматривать как функцию от степени гидратации) и кривизны контактного перешейка. За счет химического связывания жидкой фазы

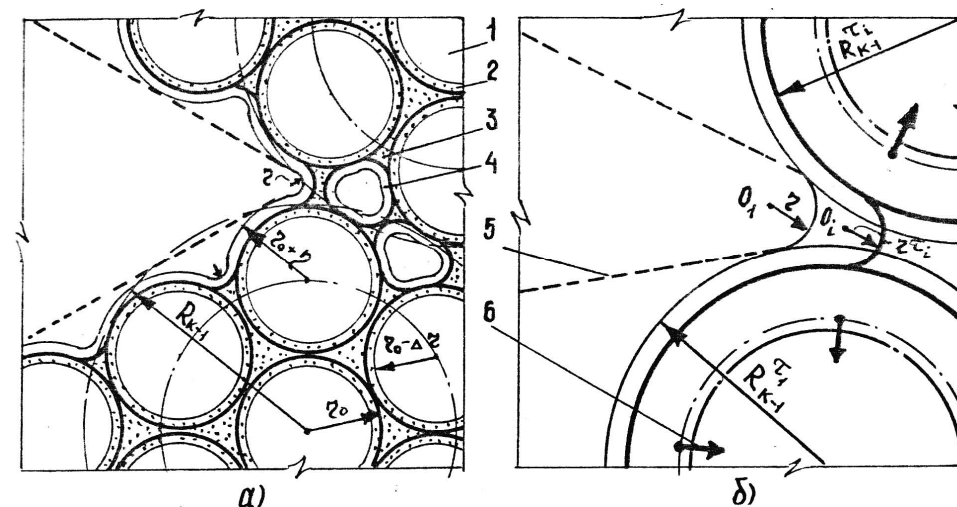
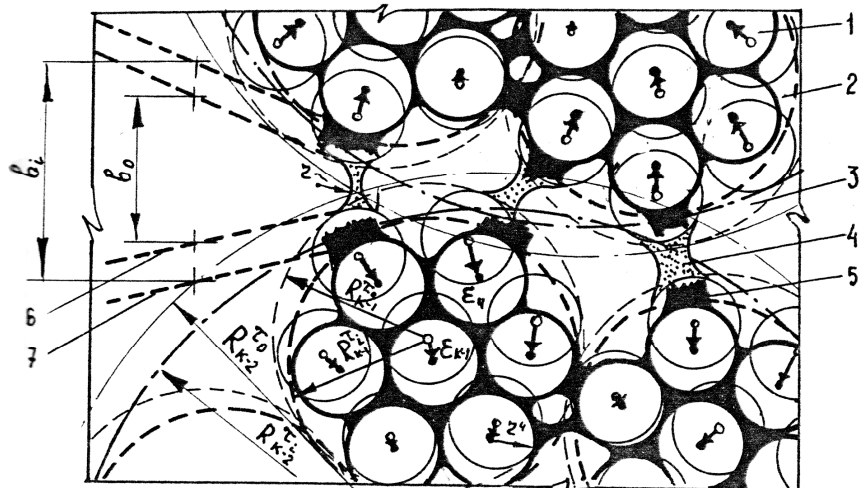


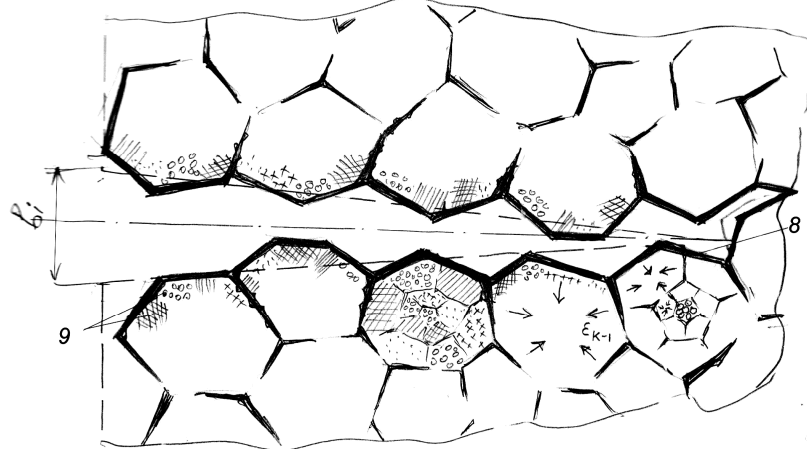
Рис. 6.1. Зародышевая трещина в микроструктуре с дискретной дисперсионной средой **а** и фрагмент зародышевой трещины **б**.
1 – ЭСЭВ; 2 – сольватные оболочки; 3 – межчастичные контактные перешейки; 4 – адсорбированные слои дисперсионной среды; 5 – берега трещины; 6 – направление перемещений кластеров К-1.

происходит уменьшение толщины адсорбированной воды с одновременным увеличением радиуса контактного перешейка в результате диффузионных переносов продуктов гидратации в зону контакта. Поэтому капиллярные силы можно представить как постоянные по величине силы, препятствующие удалению частиц друг от друга. Деформации ϵ_n и ϵ_c изменяют геометрию контактного перешейка. При этом возможно уменьшение кривизны зоны контакта, что ведет к ослаблению градиентов, инициирующих процессы диффузии. Величины ϵ_n и ϵ_c зависят от объемных деформаций кластерных структур. В определенный момент времени τ_3 , который характеризует физико-химические процессы твердения и связанные с ними объемные деформации системы, зародышевые трещины способны деформироваться по схеме, **рис. 6.1.б**.

В данном случае контактные перешейки способны играть роль тяжёлых, сдерживающих дальнейшее раскрытие ПР. В результате такого деформирования происходит перераспределение деформаций между частичками на поверхности кластеров и между кластерами, выходящими на ПР. Пластические деформации накапливаются в материале перегородок до критического значения, после чего происходит разрыв межчастичных связей по схеме, **рис.6.2 а**. Разрыв связей вызывает увеличение протяженности зародышевой трещины или ПР, на которую



а)



б)

Рис. 6.2. Схема образования зародышевых трещин при организации микро-структуры.

1 – ЭСЭВ; 2 – кластер К-1 после деформации и образования К-2; 3- начальный кластер К-1; 4 – межчастичные контактные перешейки; 5 – разрушенные межчастичные контакты; 6, 7 – изменение положения берегов зародышевой трещины; 8 – микроизвилистость берегов зародышевых трещин; 9 – участки с различным минералогическим составом. ϵ_{K-1} – направление и относительная величина перемещений частиц в кластере К-1 при образовании кластера К-2; ϵ_{K-2} – направление и относительная величина перемещений кластеров К-1 при образовании кластеров К-2.

выходит все больше кластеров и их групп. Таким образом, возникшая зародышевая трещина представляет собой межкластерную ПР, способную развиваться. Образовавшаяся зародышевая трещина характеризуется микроизвилистой траекторией с выходом на противоположные берега кластерных структур с различным минералогическим составом, рис. 6.2.б.

Введение наполнителей и образование смешанных кластерных структур может как способствовать раннему появлению зародышевых трещин, так и сдерживать ширину их раскрытия, общее количество и способность роста. Можно выделить несколько характерных случаев влияния наполнителей на механизм зарождения трещин:

1. При $F_n \geq F_3$ и $d_n / d_3 > 1$ зародышевая трещина появляется на границе раздела между смешанными кластерами в зоне максимального неупорядочения. Зарождение трещины ведет к конечному образованию кластерных структур, которые можно рассматривать как системы, порядок и плотность которых уменьшаются по мере перехода от одного к другому периферийным адсорбированным слоям. Подобные зародышевые трещины, по нашему мнению, являются наиболее опасными для такого типа структур, так как плотность ЭСЭВ в зоне их появления ниже, по сравнению с другими объемами системы. Поэтому вероятность их "самозалечивания" продуктами новообразований ниже чем у объемов, прилегающих к "структурообразующей" частице наполнителя.

2. При $F_n \geq F_3$ и $d_n / d_3 \leq 1$ зародышевая трещина появляется на межкластерных ПР. Объемные деформации смешанных кластеров ниже по сравнению с кластерами, состоящими из одних ЭСЭВ. Это ведет к увеличению критического объема кластеров и, в итоге, к общему снижению количества начальных зародышевых трещин.

3. В случае $F_n \ll F_3$ и $d_n / d_3 = 1$ частицы наполнителя, дезорганизуя дисперсную систему, создают предпосылки появлению зародышевых трещин. В отдельных случаях (рядом расположенные частицы наполнителя) их можно рассматривать как потенциальную зародышевую трещину. Это связано с тем, что такие наполнители, не участвуя в процессах упорядочения структуры, образуют (или способствуют образованию) кластеров ЭСЭВ, разделенных частичками наполнителя. В силу того, что $F_n \ll F_3$, межкластерные поверхности раздела пройдут по разные стороны частиц наполнителя, ширина раскрытия ПР сразу будет равна диаметру частицы. Поэтому их можно рассматривать не как зарождение трещин, а как появление опасных трещин.

4. Увеличение размера частичек наполнителя до $d_n / d_3 = 3 \dots 10$ при $F_n \ll F_3$ ведет к образованию зародышевых трещин на кластерных ПР при достижении К-N критического размера. Наполнители, снижая объемные деформации кла-

стерных структур, уменьшают общее количество зародышевых трещин и ширину их раскрытия.

В общем случае зародышевые трещины определяют начальную поврежденность микроструктуры КСМ. Если исходить из предположения, что на начальных этапах структурообразования КСМ микроструктура представлена дискретными блоками с размером R_k и образованием межкластерной ПР протяженностью между соседними агрегатами l_k , то расстояние между одинаково ориентированными зародышевыми трещинами соизмеримо с размером К-Н. Зародышевые трещины могут возникать между кластерами нижнего масштабного уровня К-1. Количество К-1 в объеме материала можно определить через конечный объем V системы, в котором образовался кластер объемом V_{K-N}

$$n_{K-N} = V / V_{K-N}, \quad (6.1)$$

или, введя объем кластера К-1

$$V_{K-N} = V / (V_{\ominus} + 12 V_{\ominus})^{n-1} \quad (6.2)$$

Появление зародышевых трещин на следующем структурном уровне К-2 не изменяет общее количество повреждений в материале, но ведет качественно изменению - увеличению ширины раскрытия ПР. В связи с этим целесообразно поврежденность микроструктуры оценивать по количеству кластеров критического размера. Тогда n_{KP} составит

$$n_{KP} = V / V_{KP}. \quad (6.3)$$

Таким образом начальная поврежденность микроструктуры определяется физико-механическими явлениями кластерообразования. В случае начального размера ЭСЭВ $d_3 = 2,0 \cdot 10^{-5}$ м, объем зерна составит $V_3 = 3,14 \cdot 10^{-15}$ м³. При этом объем кластера К-1 составит $V_{K-1} = 4,1 \cdot 10^{-14}$ м³. Приняв концентрацию частиц дисперсной фазы $c = 70\%$ по объему, при объеме микроструктуры КСМ $V = 0,01$ м³, количество К-1 равно $n_{K-1} = 17,5 \cdot 10^8$.

Образование К-2 ведет к увеличению объема кластера до $V_{K-2} = 6,9 \cdot 10^{-12}$ м³. Количество кластеров К-2 в 0,01 м³ составляет $n_{K-2} = 11 \cdot 10^6$.

При условии, что поверхностная активность ЭСЭВ выше поверхностной активности частичек наполнителя и при соотношении их размеров $d_n / d_3 = 10$, объем кластера К-1 $V'_{K-1} = 6,8 \cdot 10^{-11}$ м³. Общее количество таких кластеров в 0,01 м³ равно $n'_{K-1} = 10,3 \cdot 10^4$. Таким образом, физико-механические процессы направленной организации структуры при помощи наполнителей оптимальной дисперсности позволяют снизить поврежденность микроструктуры КСМ в начальные периоды более чем на два десятичных порядка.

Проведенный анализ показывает, что начальные физико-механические процессы кластерообразования микроструктуры КСМ закладывают основы появления зародышевых трещин на межкластерных ПР. Общее количество заро-

дышевых трещин определяется видом образовавшихся структурных агрегатов. Целенаправленное применение наполнителей в зависимости от соотношений поверхностных активностей частиц наполнителя и их размеров позволяет снизить поврежденность начальной структуры зародышевыми трещинами более чем на два десятичных порядка.

6.2. Условия роста зародышевых трещин в период организации микроструктуры КСМ

Появление в структуре материала зародышевых трещин закладывает основы их возможного роста до трещин, соизмеримых с характерными структурными неоднородностями. Зародышевые трещины возникают в начальные периоды структурообразования КСМ. Поэтому важной задачей является определение условий развития зародышевых трещин в период структурообразования и твердения микроструктуры КСМ.

Под трещиной будем понимать внутреннюю по отношению к рассматриваемому материалу ПР, которую можно охарактеризовать длиной a_r , шириной раскрытия b_r , фронтом l и радиусом устья r_r . При этом будем исходить из следующих допущений:

- зародышевые трещины появились в среде, которая на начальных этапах обладает пластическими деформациями;
- свойства среды с зародышевыми трещинами поэтапно переходят из пластичного в вязкоупругое и упругое состояние;
- при переходе из одного в другое реологическое состояние среда с микротрещинами претерпевает объемные деформации;
- объемные деформации проявляются на внутренних поверхностях раздела (берегах зародышевых трещин).

Выделим участок структуры, включающий зародышевую трещину и участки, примыкающие к устью трещины, **рис.6.3**. Это необходимо для анализа процессов, протекающих в моменты времени, предшествующие сдвигу трещины и начала ее роста. Анализ литературных источников позволил определить условия, при которых нарушается равновесное состояние трещин определенного размера и они начинают развиваться в материале. При этом исходят из кинетических представлений оценки долговечности материала, основные зависимости которых предложил С.Н.Журков. Согласно кинетического подхода разрушение представляет собой многостадийный процесс зарождения трещин, накопление трещин в объеме до критического количества, слияние микротрещин в макротрещину и ее рост до магистральной трещины. При рассмотрении условий роста трещин исходят, как правило, из условия приложения к материалу внешних

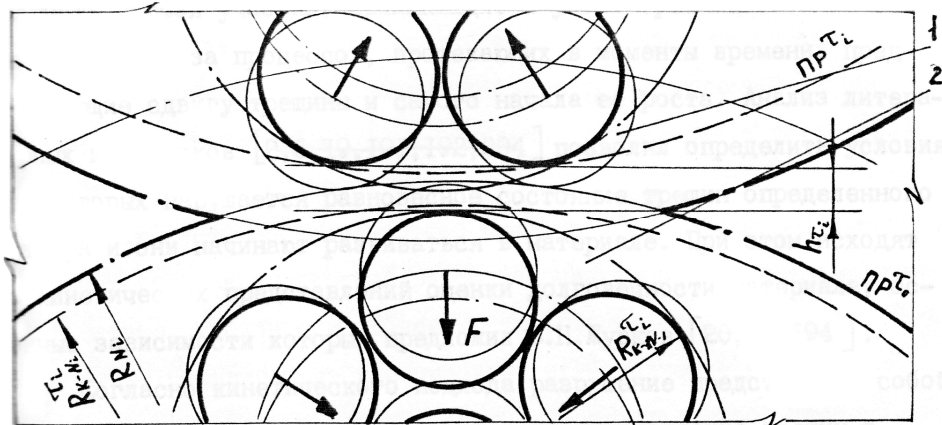


Рис. 6.3. Схема взаимодействия и деформирования кластерных структур. 1 – ЭСЭВ; 2 – кластер К-1; F – направление перемещений ЭСЭВ в К-1; $PR\tau_i$ – образование межкластерной ПР; $PR\tau_e$ – формирование межкластерной ПР; h – ширина раскрытия межкластерной ПР.

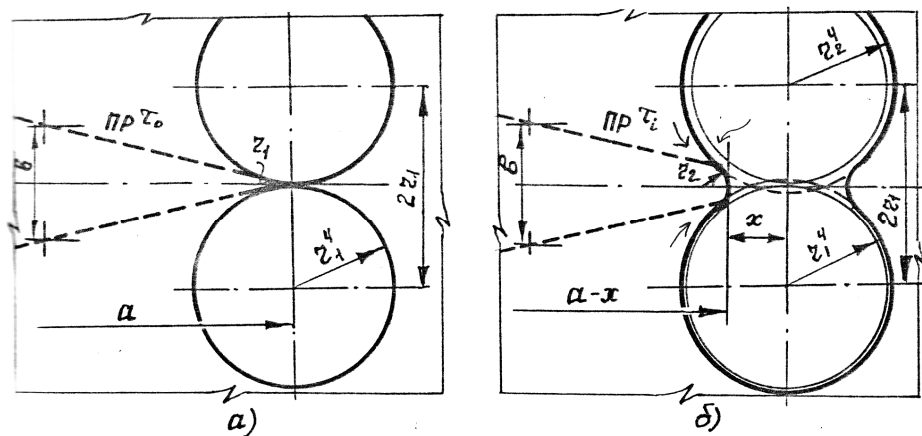


Рис. 6.4. Механизм притупления устья зародышевой трещины. а – фрагмент трещины в момент образования межчастичного контакта; б – фрагмент устья зародышевой трещины после образования межчастичного контактного перешейка. r_1 и r_2 – радиусы устья до и после образования контактных перешейков; x – радиус площадки проектирования.

нагрузок. В зависимости от вида внешних напряжений, размерных факторов трещин и характеристик материала, в котором они развиваются, определены основные виды разрушения, силовые и энергетические критерии роста трещины с поправкой на возникающие при определенных значениях напряжений пластических деформаций (поправка Орована). В условиях общей текучести материала введено понятие раскрытия трещины (РТ). При всех этих подходах предполагается, что под действием внешней нагрузки в районе устья трещины возникают напряжения или деформации критического значения, что ведет к росту трещины через образование новых поверхностей.

В рассматриваемом случае зародышевая трещина представляет собой границу раздела между кластерными структурами. Таким образом, берегами трещины являются кластеры К-Н. Сами зародышевые трещины появляются в период достаточно интенсивных объемных деформаций кластерных структур. При этом происходит изменение внешней границы раздела кластера - берега зародышевой трещины. В результате физико-химических процессов гидратации ЭСЭВ происходит сокращение ПР кластерных структур. Увеличивается ширина раскрытия межкластерной ПР b с передачей деформаций в устье трещины до критических значений $\Sigma\epsilon_{кр}$.

Разрыв контактного перешейка может происходить в результате совместных деформаций берегов рядом расположенных зародышевых трещин. В случае стабилизации объемных деформаций системы, берега трещин не будут раздвигаться и произойдет их заполнение продуктами новообразований. Таким образом, можно выделить первое необходимое условие зарождения трещин в период структурообразования КСМ - для зарождения необходимы объемные деформации отдельных структурных блоков системы.

Важным, по нашему мнению, является соотношение скорости развития объемных деформаций микроструктуры и кинетики ее структурирования. В случае медленного развития начальных деформаций $\Delta V/dt$ при достаточно быстром наборе структурной прочности dP_c/dt , наряду с релаксацией деформаций в материале межчастичных перегородок, происходит их рост и "затупление" кончика трещины за счет направленного диффузионного массопереноса по схеме, рис. 6.4.

При углублении процессов гидратации изменяется природа межчастичных контактов - система переходит в упругое состояние, что ведет к концентрации в зоне контакта напряжений. Рост таких трещин связан в этом случае с интенсивностью концентрации напряжений и протекает в периоды окончательного набора прочности и эксплуатации КСМ. Поэтому вторым необходимым условием образования зародышевых трещин в начальные периоды организации микро-

структуры являются опережающие значения пластических деформаций $V/d\tau$ по сравнению со временем их релаксации и перехода системы в другое реологическое состояние.

Таким образом, в микроструктуре КСМ возможны условия, обеспечивающие зарождение трещин на начальных этапах структурообразования без воздействия внешних нагрузок.

6.3. Механизм развития трещин в микроструктуре КСМ

При рассмотрении механизмов развития трещин в твердеющей гетерогенной среде рассмотрим структурный уровень, на котором материал представлен неоднородностями "кластер - кластер" и макроуровень, на котором отдельные неоднородности нивелируются и среду можно характеризовать макропараметрами. Такой качественно отличный характер описания механизмов развития трещин представляется необходимым в силу следующих причин:

- уровни структурной неоднородности позволяют оценить влияние их на характер и микропроцессы роста трещины в дискретной среде, но не позволяют представить кинетику и траекторию трещины на более высоких масштабных уровнях;

- макромеханический характер движения трещин в микроструктуре, как непрерывной среде, позволяет оценить кинетику развития трещин, их форму и степень опасности в материале без учета единичных актов межчастичных и межкластерных взаимодействий.

6.3.1. Микроструктурный механизм развития трещин в гетерогенной среде, претерпевающей объемные деформации усадки

Как было показано, зародышевые трещины, возникшие на межкластерных ПР, способны развиваться до трещин, соизмеримых с неоднородностью "кластер - кластер". Последующие деформационные процессы создают условия развития трещин в период структурообразования материала. При объемных деформациях К-Н в случае dV/dt трещина стремится увеличить свой размер. Возможны ситуации, при которых происходит поэтапный рост трещины путем последовательного разрыва межчастичных контактов (рис.6.5.а.) и процесс укрупнения трещины через разрушение разделяющих их межчастичных и межкластерных контактов (рис.6.5.б.). В том и другом случаях движение трещины представляет собой не непрерывный процесс, а дискретные акты поэтапного роста. Можно выделить следующие этапы роста трещин в процессе структурообразования дисперсных систем:

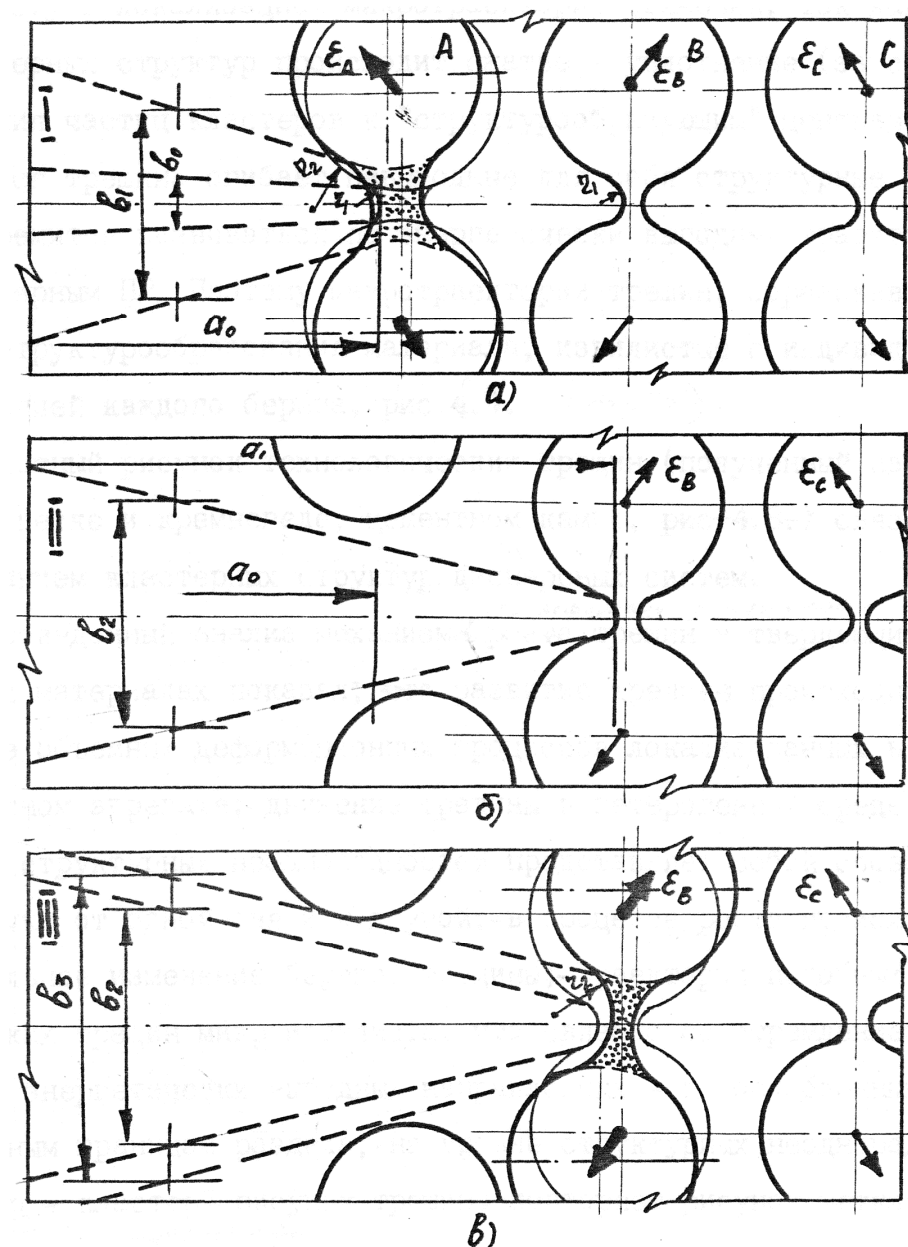


Рис. 6.5. Микроструктурный механизм роста технологической трещины ЭСЭВ. I, II, III – этапы накопления пластических деформаций и роста технологической трещины с начальной длиной a_0 , шириной раскрытия b_0 и радиусом устья r_1 .

I-ый этап - накопление пластических деформаций в зоне межчастичных или межкластерных контактов за счет собственных объемных деформаций твердеющей системы. На этом этапе происходит необратимое деформирование берегов трещины (явления пластического гистерезиса) в силу различных деформаций по величине и направлению. При этом для каждого берега возможно свое индивидуальное изменение и морфологии, [рис 6.5.а.](#)

II-ой этап - разрушение зоны контакта и увеличение протяженности трещины на величину, равную расстоянию между межчастичным контактам $\Delta b/d$. При этом работа тратится на образование поверхности разрушения, равной площади межчастичного контакта πx^2 . Это облегчает задачу образования новых поверхностей, [рис.6.5.б.](#)

III-ий этап - очередное накопление пластических деформаций с их перераспределением на новых берегах трещины. Третий этап завершает цикл скачкообразного роста трещины и начинает новый. На образовавшихся берегах трещины появляются новые поверхности раздела кластеров, что ведет к очередному их видоизменению, [рис.6.5 в.](#) На берега такой трещины выходят межкластерные ПР (зародышевые трещины) более низкого масштабного уровня. Они вызывают частичное релаксирование деформаций каждого берега и замедляют или способствуют ее росту с локализацией микротраектории движения. Так как внутри кластерных структур происходит сжатие и уплотнение (за счет стремления частиц кластеров к "структурообразующим" центрам), то движущаяся трещина огибает невыгодные для себя структурные блоки. Она стремится развиваться по энергетически выгодным траекториям - межкластерным ПР. Поэтому микротраектории трещин, образовавшихся в период структурообразования материала, извилистые с индивидуальной морфологией каждого берега, [рис.6.6.](#)

Сложный рисунок технологических трещин (полученный на глине, молотых песке и кремнегеле, цементном камне) связан с образованием кластерных структур дисперсных систем.

Проведенный анализ механизмов трансформации зародышевых трещин в твердеющих гетерогенных материалах показал:

- развитие трещин происходит в результате объемных деформационных процессов локализованных в каждом структурном агрегате;
- движение трещины в гетерогенной среде на уровнях структурных неоднородностей представляет собой своеобразные скачки от одной связи к другой;
- в процессе роста происходит индивидуальное изменение берегов трещины;
- траектория подобных технологических трещин микроизвилиста, что связано со стремлением трещин развиваться в энергетически выгодных направлениях - по ослабленным межкластерным границам раздела;

- на уровне структурных неоднородностей "кластер - кластер" рисунок трещины повторяет рисунок межкластерных ПР.

Рост каждой зародышевой трещины изменяет микродеформативное состояние отдельных объемов системы, что может способствовать или замедлять рост соседних трещин. Поэтому в материале присутствуют, как правило, трещины различных длины, формы, ширины раскрытия.

6.3.2. Макроструктурные особенности развития трещин в материале, претерпевающим объемные деформации

При рассмотрении механизма роста трещины в среде, претерпевающей объемные деформации усадки, введены следующие ограничения:

- среда, в которой развивается трещина, представляет собой на "макроуровне" однородную и изотропную;
- между величиной объемных деформаций и объемом материала существует линейная зависимость;
- объемные изменения передаются на внешние и внутренние ПР;
- на систему не действуют внешние нагрузки - объемные деформации возникают в результате собственных процессов и явлений (проявляться эффект своеобразного самодвижения).

Предположим, что трещина появилась в полубесконечной пластине с определенными выше свойствами. Ось трещины проходит через ось симметрии пластины. Поэтому деформации усадки на берегах трещины равны: $\epsilon_{AO} = \epsilon_{BO}$, [рис. 6.7.](#)

Под действием усадочных деформаций берега трещины раздвигаются на величину $2\Delta b$. В зоне устья накапливаются пластические деформации $\epsilon_{пл}$. При достижении предельного значения $\epsilon_{пл}^k$ происходит нарушение сплошности материала. Длина трещины увеличивается на Δa . Одновременно с ростом трещины происходит очередной этап накопления пластических деформаций. Зона пластических деформаций движется перед устьем трещины за счет непрекращающегося развития объемных процессов. На "макроуровне" трещина растет непрерывно. Можно сказать, что скорость роста трещины определяется величиной Δb и кинетикой $\Delta \epsilon/dt$ объемных деформаций

$$\Delta a = \Delta b/2 \operatorname{tg}(r_T/2). \quad (6.4)$$

В реальных материалах совпадение осей симметрии трещины и среды, в которой она развивается, представляет собой частный случай роста трещины. Более об-

шей является ситуация, при которой на берегах трещины возникают разновеликие объемные деформации, **рис.6.8.**

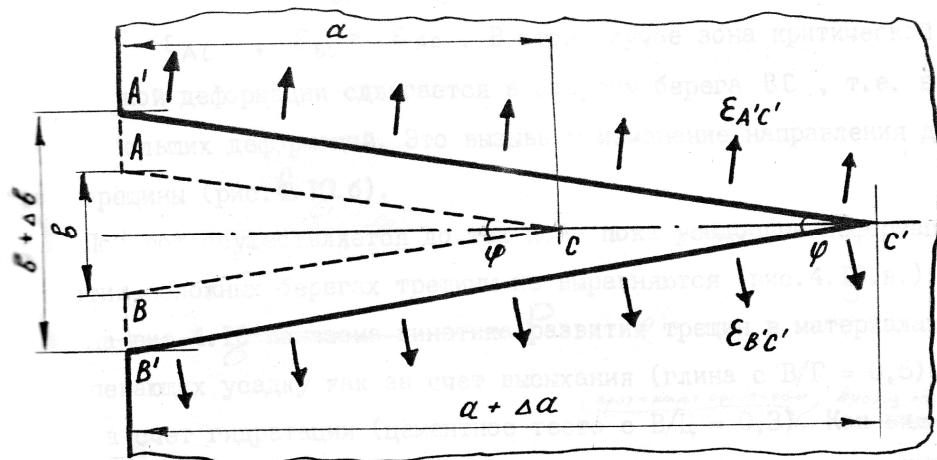


Рис. 6.7. Механизм роста технологической трещины на макроуровне.
 a – начальная длина технологической трещины с шириной раскрытия b ; φ – радиус устья трещины; Δa и Δb – приращение длины и ширины раскрытия трещины; ε_{AC} и ε_{BC} – деформации берегов трещины по условию $\varepsilon_{AC} = \varepsilon_{BC}$.

Пусть берег зародышевой трещины BC воспринимает большие усадочные деформации ε_{BC} по сравнению с усадочными деформациями берега AC ε_{AC} , $\varepsilon_{BC} > \varepsilon_{AC}$. В этом случае зона критической пластической деформации сдвигается в сторону берега BC , т.е. в сторону больших деформаций. Это вызывает изменение направления движения трещины, **рис. 6.8.б.**

Поворот осуществляется до тех пор, пока деформации на противоположных берегах трещины не выровняются, **рис. 6.8.в.**

Развитие трещин в материалах, претерпевающих усадку как за счет высыхания (глина с $В/Г = 0,6$), так и за счет гидратации (цементное тесто с $В/Ц = 0,3$) протекают одинаково. Анализ позволяет заключить, что направление и кинетика развития технологических усадочных трещин в период твердения материалов не зависят от вида вяжущего, физико-химических и физико-механических процессов, вызвавших объемные изменения, т.е. механизм развития трещин в пластичных средах является общим на "макроуровне" для класса материалов, претерпевающих при своем твердении объемные деформации уменьшения объема. Таким образом, механизм развития технологических трещин на "макроуровне" микроструктуры определяется величиной и градиентом объемных деформаций на про-

тивоположных берегах трещины. Градиенты объемных деформаций определяют направление роста трещины и стремятся к выравниванию значений у ее устья.

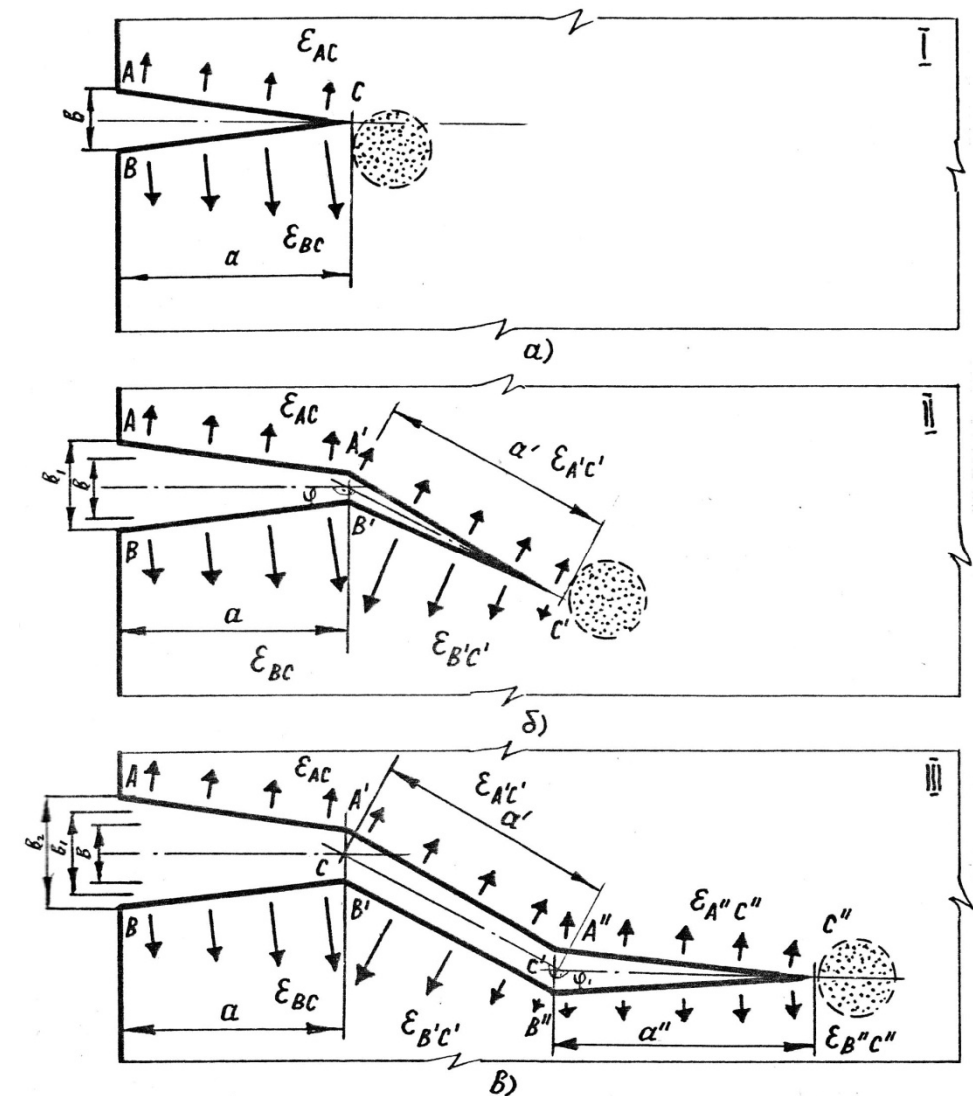


Рис. 6.8. Механизм изменения направления движения технологической трещины в период твердения микроструктуры КСМ на минеральных вяжущих.
 $\varepsilon_{AC}, \dots, \varepsilon_{B'C'}$ – деформации берегов трещины; φ, φ_1 – изменение направления движения технологической трещины.

На "макроуровне" реализуется условно непрерывный рост зародышевой трещины, зависящий от величины и кинетики объемных деформаций микроструктуры КСМ. Введение наполнителей, снижая величину усадочных деформаций, способствует замедленному развитию трещин.

Проведенные исследования и анализ позволили установить качественное различие механизмов роста технологических трещин на уровнях структурных неоднородностей и на "макроуровне", на котором материал представлен непрерывной средой. На уровне структурных неоднородностей трещина развивается скачкообразно с микроизвилистой траекторией по межкластерным ПР, на "макроуровне" движение трещины представляется условно непрерывным с общим направлением, зависящим от градиентов деформаций по величине на ее противоположных берегах. Микродеформации вызывают необратимое деформирование каждого берега. Этому способствует также и изменение прямолинейности движения трещин на "макроуровне". Происходит индивидуальное изменение фактуры и морфологии каждого берега, что не позволяет осуществиться полному смыканию технологических трещин при возможных деформациях обратного знака. "Самозалечивание" технологических трещин возможно путем зарастания их объемами продуктами гидратации или в результате коррозионного воздействия среды (например, в результате карбонизации). Применение наполнителей замедляет рост трещин в твердеющей среде и ведет к снижению поврежденности микроструктуры наследственными дефектами.

6.4. Механизм развития технологических трещин в трещины эксплуатации

6.4.1. Условия эксплуатации строительных конструкций

Бетон обычный тяжелый применяется при массовом строительстве жилых, общественных и промышленных объектов. Анализ литературных данных показывает, что бетон строительных конструкций различного назначения воспринимает целый комплекс климатических нагрузок, напрямую не связанных с нормируемыми эксплуатационными нагрузками. К таким нагрузкам, действующим на наружные конструкции, можно отнести: - сезонные колебания температуры; - суточные изменения температуры; - изменение влажности; - температурно-влажностные градиенты (сезонные, суточные).

Сезонные изменения температуры предполагают не только изменение средней температуры в весенне-летний и осенне-зимний периоды, но и достижение максимальных температур. Анализ климатических условий Украины и, в частности, Одесской области и г. Одессы показал, что в весенне-летний период

максимальные значения температур воздуха могут изменяться от $T=0^{\circ}\text{C}$ (май) до $T=+35^{\circ}\text{C}$ (июль-август). Температура воздуха не может характеризовать температуру конструкции. При температуре воздуха $T=+35^{\circ}\text{C}$ температура на поверхности конструкции может достигать $T=60...65^{\circ}\text{C}$ (даже при температуре воздуха $T=0^{\circ}\text{C}$, температура поверхности может быть в пределах $T=10...20^{\circ}\text{C}$).

В осенне-зимний период в отдельные дни января и февраля температура может снижаться до значений $T=-20...25^{\circ}\text{C}$. При этом наблюдается многократное изменение температуры от плюсовых до отрицательных значений. Переход температуры через $T=0^{\circ}\text{C}$ вызывает замерзание воды в теле бетона, что приводит к необратимым структурным изменениям. Это ставит задачу предъявлять к материалу наружных конструкций требований по обеспечению его морозостойкости.

При средней сезонной температуре особенное внимание, по нашему мнению, следует уделять суточным колебаниям температуры. В летний период изменение температуры поверхности строительных конструкций может составлять $40...50^{\circ}\text{C}$ (от $T=+65^{\circ}\text{C}$ в дневное время до $T=18...20^{\circ}\text{C}$ в ночное время). В зимний период при среднесуточной температуре $T=+3...5^{\circ}\text{C}$, температура днем может доходить на поверхности конструкции до $T=+5...10^{\circ}\text{C}$ с последующим снижением температуры поверхности до $T=-3...5^{\circ}\text{C}$ в ночное время. Количество циклов суточного изменения температуры от плюсовых до отрицательных значений может достигать 80... 120 циклов за один осенне-зимний сезон.

Кроме температурных воздействий, наружные строительные конструкции претерпевают многократное увлажнение и высушивание. Увлажнение конструкций может происходить за счет сорбционной влажности, туманов, дождей, таяния снега и льда. Высушивание конструкций происходит за счет солнечной радиации, ветра. Количество циклов увлажнения и высушивания зависит от суточного и сезонного изменения влажности.

Как правило, не происходит отдельного воздействия температуры и влаги. Два этих фактора неразрывно связаны друг с другом. Даже в сухое время градиенты температур поверхности изделия и периферийных зон вызывают миграцию поровой жидкости бетона как капиллярно-пористого тела. Кроме того, температурные и влажностные воздействия неравномерно распределяются по объему изделия. Это создает предпосылки возникновения градиентов влажностных и термических деформаций по сечению конструкций. В силу того, что температурные и влажностные внешние воздействия подчиняются определенным циклам (суточным, сезонным), то можно предположить, что деформационные "волны" постоянно проходят через изделия.

Материал конструкций реагирует на всю совокупность внешних климатических воздействий путем многократного изменения объема материала, что вызывает изменения структуры и, в итоге, возможного снижения свойств

ниже уровня нормируемых значений. Повторяющиеся внешние воздействия, связанные с изменением температуры и влажности относят к малоцикловым воздействиям, что ведет к усталости материала.

6.4.2. Механизмы развития трещин при малоцикловых усталостных нагрузках

Под усталостным разрушением понимают постепенное накопление повреждений в результате периодического воздействия напряжений или деформаций с переменной амплитудой до образования опасной для данной структуры трещины и ее необратимого роста. При этом отмечается, что действующие напряжения могут быть значительно ниже напряжений, которые вызывают разрушение материала при испытаниях на одноосное растяжение.

Зарождение усталостных трещин связывают с тем, что под действием напряжений растяжения в некоторой наиболее удобно расположенной плоскости происходит сдвиг. Сдвиг в обратном направлении происходит по параллельной плоскости. При этом может происходить выдавливание (экструзия) либо вдавливание (интрузия) поверхности материала. При переменных напряжениях вдавливание можно представить как зародышевую трещину, которая способна укрупняться до длины, при которой определяющим условием дальнейшего роста становятся напряжения у ее вершины.

Предполагается, что в поле высоких напряжений в вершине трещины происходит сдвиг. Это вызывает увеличение ширины раскрытия трещины и ее рост. Под действием сжимающих напряжений ширина раскрытия трещины уменьшается и возникающие пластические деформации способствуют восстановлению острого устья. После чего цикл повторяется, и трещина растет на очередную величину Δa_i .

Подобный циклический рост усталостной трещины вызывает изменения в рисунке поверхности разрушения - появляются бороздки усталости, которые фиксируют последовательное положение фронта. Для количественной оценки скорости распространения усталостной трещины исходят из предположения, что длина трещины a за один цикл знакопеременных напряжений N изменяется в зависимости от изменения коэффициента интенсивности напряжений в цикле $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ и констант материала C и m . На основании механизма развития трещины за один цикл предложено соотнести скорость распространения трещины с величиной ее раскрытия. Однако, как показали опыты усталостная прочность материалов с одинаковым модулем Юнга может обладать различными значениями (разной скоростью роста трещины).

Для материалов, претерпевающих значительные знакопеременные деформации, введены деформационные критерии усталостного разрушения, под которыми понимаются критерии, связанные с циклическими деформациями. Установлена связь между неупругой деформацией за цикл $\epsilon_{пл}$, амплитудой деформации $\Delta \epsilon$, амплитудой напряжений и модулем упругости материала.

Таким образом, при оценке усталостной стойкости материалов исходят из энергетического и деформационного подходов. Такие подходы справедливы при изучении усталости КСМ на органическом и неорганическом вяжущем. Как правило, исследования усталостной стойкости связаны с многоциклового механической нагрузкой. Знакопеременные эксплуатационные нагрузки окружающей среды можно отнести к малоцикловым воздействиям. При этом внешние воздействия вызывают внутренние деформационные процессы, проявляющиеся на берегах трещин, т.е. знакопеременные объемные изменения материала являются внутренними спонтанными процессами. Поэтому представляет интерес изучение малоциклового усталости КСМ при их знакопеременных объемных изменениях.

При анализе усталостной стойкости введены следующие ограничения и допущения:

- микроструктура представляет собой непрерывную среду с определенными эффективными характеристиками;
- трещины в микроструктуре представляют собой внутренние прямолинейные поверхности раздела с определенными геометрическими характеристиками (длина a , ширина раскрытия b , радиус устья r , длина фронта l);
- объемные деформации микроструктуры проявляются на внешних по отношению к ней ПР;
- свойства микроструктуры практически не изменяются внутри одного цикла знакопеременных объемных изменений;
- объемные деформации возникают без градиентов по сечению образцов.

Представим полубесконечную пластину с трещиной, расположенной по оси симметрии, **рис.6.9.а**. Материал пластины претерпевает знакопеременные объемные деформации. Цикл начинается с увеличения объема. В силу принятых допущений на берега трещин будет действовать равномерно распределенная деформация объемов материала, обращенных к своему берегу, **рис. 6.9.а**.

Под действием возникших деформаций берега трещины начнут сближаться на величину Δb_n . В случае, когда деформации, которые проявляются на берегах трещины, $\Delta b'_n$, меньше либо равны эффективной ширине раскрытия трещины b_n , $\Delta b'_n < b_n$, будет происходить пластическое деформирование. При $\Delta b'_n \geq b_n$ берега трещины встречаются друг с другом. Часть трещины начинает рабо-

татъ как сам материал и, в этом участке, упругие деформации ε_y преобладают над пластическими $\varepsilon_{пл}$, $\varepsilon_{уп} > \varepsilon_{пл}$. В случае параллельности берегов трещины,

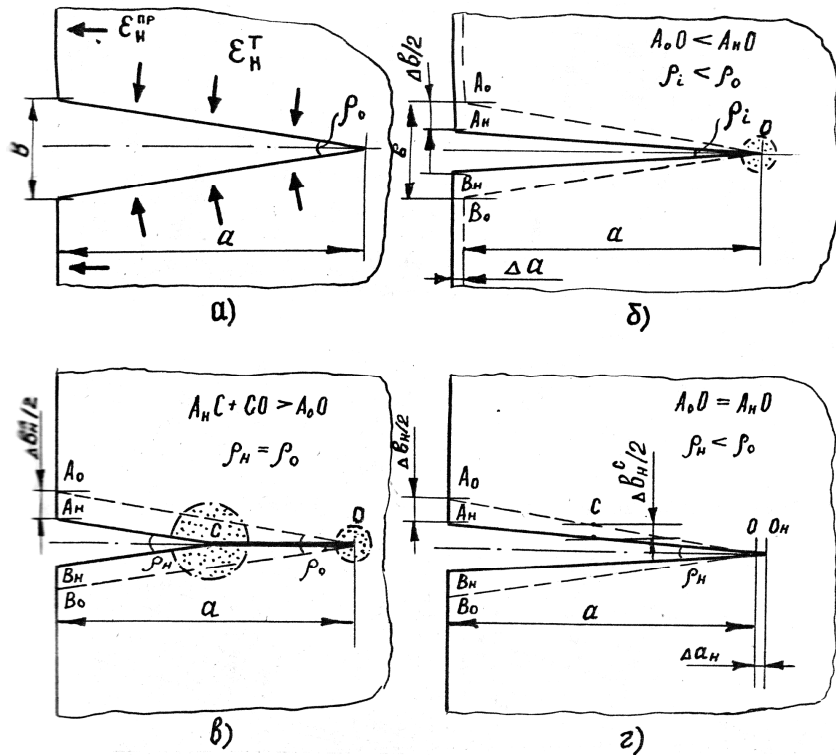


Рис. 6.9. Механизм усталостного роста технологической трещины.

а – геометрические параметры наследственной трещины; **б** – изменение геометрии трещины в случае пластических деформаций у ее устья; **в** – изменение параметров трещины в случае пластического деформирования материала у устья и на берегах; **г** – изменение параметров трещины за счет ее роста.

их смыкание и общую деформацию можно выразить через пластическую $\varepsilon_{пл}$ и упругую $\varepsilon_{уп}$ части. Так как пластическое деформирование возможно только в зоне ширины раскрытия трещины, то $\Delta b_{н} = \varepsilon_{пл}$ и можно записать

$$\varepsilon = \Delta b_{н} + \varepsilon_{уп} \quad (6.5)$$

Смыкание клинообразных трещин практически невозможно, за исключением следующих случаев: - пластического деформирования материала берегов трещины, что ведет к изменению их средних свойств в зоне деформирования и не рассматривается в нашем случае; - формоизменения границ раздела, что вы-

ходит за рамки рассмотрения; - шарнирного поворота пластины вокруг устья трещины (подобная ситуация не рассматривается). В остальных случаях полное смыкание трещины не происходит.

Для количественной оценки доли пластического деформирования можно ввести понятие эффективной ширины раскрытия трещины, которое можно определить как средний размер ее ширины.

Эффективная ширина раскрытия трещины \bar{b} зависит от ее длины a и ширины раскрытия b и может быть определена геометрическим путем

$$\bar{b} = a \cos(\varphi/2). \quad (6.6)$$

Тогда деформация образца с трещинами n_T при увеличении объема материала будет равна

$$\varepsilon = n_T a \cos(\varphi/2). \quad (6.7)$$

При уменьшении объема V_0 микроструктуры до значений $V_0 / \Delta V_y < 1$ деформации усадки вызывают раскрытие трещин. Деформации берегов до значе- ний \bar{b} можно отнести к упругой части усадочных деформаций. После этого наступает период пластического деформирования. В силу принятых допущений, трещина не может искривить свои берега, а материал изменить свои средние характеристики. Поэтому, в случае $\Delta b'_y \geq b_T$, происходит увеличение длины трещины на величину Δa_y , рис. 6.9.г.

Увеличение длины трещины происходит одновременно с увеличением ширины ее раскрытия Δb_y . Абсолютные значения Δb_y и Δa_y зависят от начальных b_0 и a_0 и величины деформаций усадки, проявляемых на берегах трещины $\Delta \varepsilon_y$. Между увеличением ширины раскрытия трещины Δb_y и приращением ее длины существует зависимость

$$\Delta a_y = \Delta b_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2). \quad (6.8)$$

Так как ширина раскрытия определяется величиной деформаций усадки и, в нашем случае, равна ей, то можно записать

$$\Delta a_y = \Delta \varepsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2). \quad (6.9)$$

Следовательно, общая линейная усадка образца, с трещиной при уменьшении объема материала будет равна

$$\varepsilon = n \Delta \varepsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2). \quad (6.10)$$

Каждый цикл знакопеременных деформаций будет вызывать рост трещины на величину Δa_y . Изменение длины трещины за один цикл $\Delta a_y / dN$ зависит от Δb_y и $\Delta \varepsilon_y$.

$$\Delta a_y / dN = \Delta b_y / \Delta \varepsilon_y. \quad (6.11)$$

Если принять равномерность усадочных деформаций от цикла к циклу, то долговечность в условиях малоциклового усталости или количество циклов N , будет зависеть от начальной длины трещины a_0 , ширины ее раскрытия b_0 , величины усадочных деформаций ϵ_y и отношения площади трещины к сечению образца $S_T / S_{Об}$ (при условии, что фронт трещины представляет собой прямую линию и при $a_T = 0,25a$ примем, что образец вышел из строя). Величину a_T можно определить из условия

$$a_T \approx 0,25a; a_T \approx \Delta a_y N \quad (6.12)$$

Кроме подрастания трещин в условиях знакопеременных деформаций не исключены ситуации, при которых на берегах трещин зарождаются и развиваются новые для данного структурного уровня трещины, рис. 6.10.б. Зарождение и развитие новых трещин ведет к изменению поврежденности материала эксплуатационными трещинами.

Проведенный анализ показал, что долговечность, при принятых допущениях, определяется параметрами начальной трещины и амплитудой и количеством знакопеременных объемных деформаций.

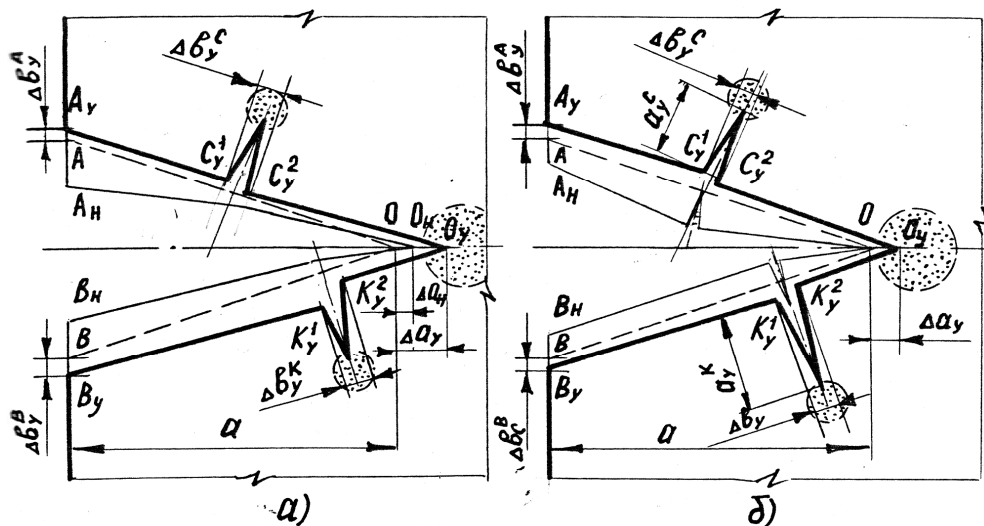


Рис. 6.10 Механизм роста и ветвления трещины при уменьшении объема материала..

а – основной трещины и появление зародышевых трещин на берегах; б – рост основной трещины и подрастание зародышевых трещин, возникших при увеличении объема материала.

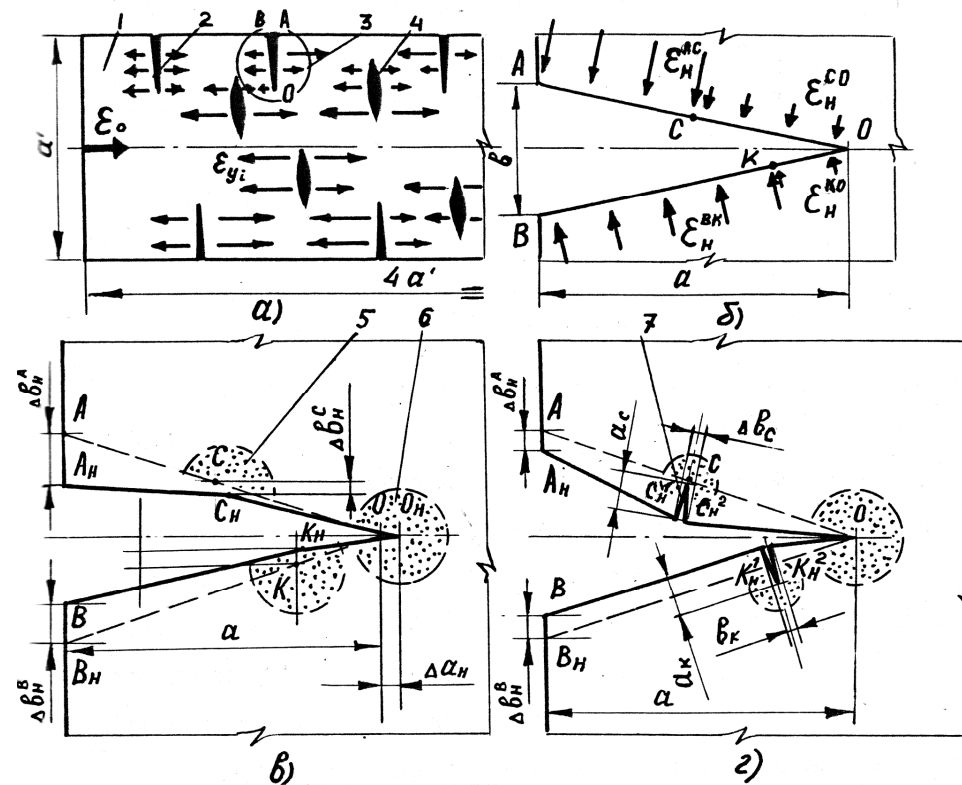


Рис. 6.11. Механизм роста технологической трещины при действии на ее берега разновеликих усадочных деформаций.

а – распределение усадочных деформаций в образце с трещинами; б - распределение усадочных деформаций на берегах трещины; в - изменение параметров трещины за счет пластического деформирования берегов и устья; г – изменение параметров трещины за счет появления на ее берегах зародышевых трещин.

1 – образец; 2 – поверхностные трещины; 3 – разновеликие деформации усадки; 4 – трещины в объеме материала; 5 – зоны пластического деформирования берегов; 6 - зоны пластического деформирования материала у устья трещины; 7 – новые ПР на берегах.

В реальных образцах происходит неравномерное распределение деформаций как по длине трещины, так и на ее берегах, рис.6.11.а.

Увеличение объема материала вызывает неравномерное распределение деформаций на берегах трещин, рис. 6.11.б.

Распределение деформаций в районе трещины А анализировали при помощи графо-аналитического метода. Анализ показал, что в силу геометрических особенностей взаиморасположения трещин разных размеров на их берегах проявляются деформации, отличающиеся по величине. Неравномерное распределение вызывает появление деформаций сдвига ϵ_c . Они могут возникнуть как на противоположных берегах трещины, так и ее устья. На берегах трещины ϵ_c способны образовывать участки выдавливания и вдавливания, что ведет к образованию усталостных зародышевых трещин. Сдвиг в вершине трещины ведет к ее подрастанию на величину Δa . Градиент деформаций определяет и направление развития такой трещины. При увеличении объема материала, в случае неравномерного распределения деформаций на берегах трещин, возможен рост и появление зародышевых трещин по схеме, рис. 6.11.б. Это ведет к полному изменению распределения деформаций на этапе усадки материала. Усадочные деформации проявляются на новых ПР, что усиливает градиенты деформаций по величине и направлению, рис. 6.11.г.

Возникшие новые градиенты деформаций ведут к увеличению ширины раскрытия Δb_y , протяженности, количества усталостных трещин. Такой процесс способствует накоплению повреждений в единице объема структуры. Усталостная долговечность материала в таких случаях определяется степенью объемного накопления повреждений.

Накопление повреждений до критического значения, при котором они способны сливаться в магистральную трещину, определяет стойкость материала в условиях знакопеременных деформаций.

В свою очередь, степень поврежденности можно выразить через или общую протяженность поверхностных трещин на образце Σa_T , или через соотношение площади, ограниченной трещинами S_T к площади образца, на которой появились трещины S_0 .

Микроструктуру КСМ можно представить как материал, организованный по типу "блок в блоке" ("кластер в кластере"). Знакопеременные объемные деформации развиваются как в каждом блоке, так и в структуре в целом. На этапе увеличения объема происходит частичное смыкание межблочных трещин, особенно их параллельных участков, и увеличение ширины раскрытия на участках разнонаправленных деформаций, рис. 6.12.

Как при увеличении объема материала, так и при его уменьшении, происходит концентрация напряжений растяжения в вершине наследственной трещины. Это связано с индивидуальными особенностями каждого берега. Поэтому, даже при смыкании трещины, микронеровности вызывают концентрацию деформаций и напряжений в устье трещины по схеме, рис. 6.13.

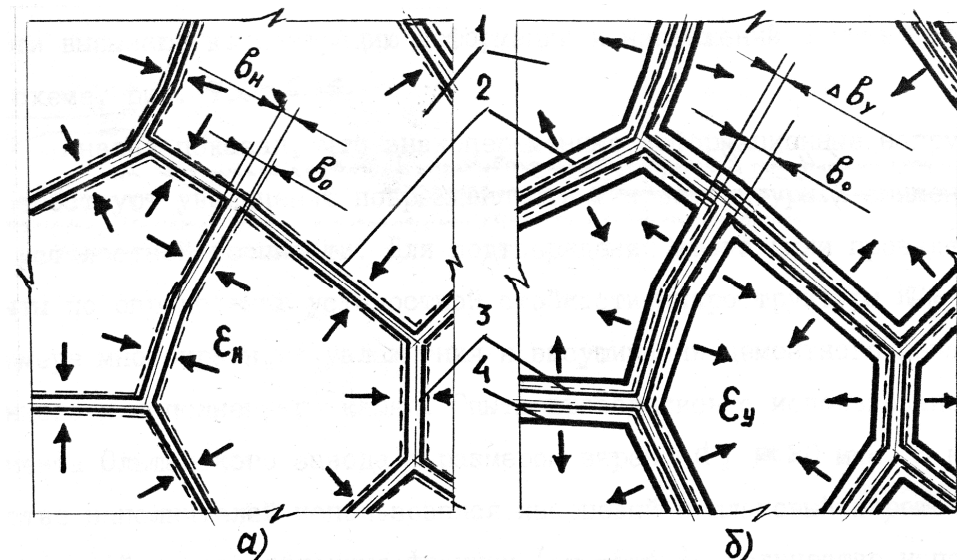


Рис. 6.12. Изменение ширины раскрытия трещин при уменьшении (а) и увеличении (б) объема материала полиблочного строения.

1- кластеры К-Н; 2 – трещины; 3 – берега трещин после усадки; 4 – берега трещин после набухания.

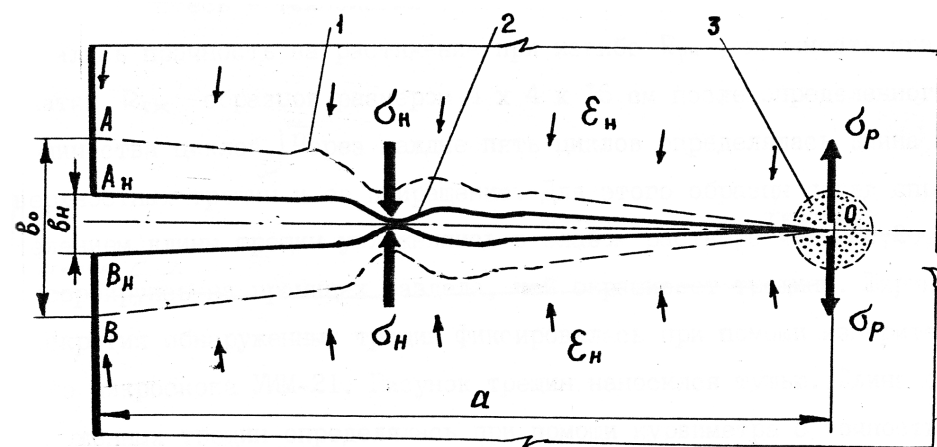


Рис. 6.13. Механизм роста при смыкании берегов трещины.

1 – технологическая трещина; 2 – микронеровности берегов трещины; 3 – зона возможного пластического деформирования материала.

6.4.3. Влияние технологической поврежденности на усталостную стойкость микроструктуры

Анализ показал, что знакопеременные температурные и влажностные деформационные нагрузки способствуют увеличению поврежденности микроструктуры путем трансформации технологических трещин в трещины эксплуатации. Это может привести к снижению усталостной стойкости материала. Для подтверждения были проведены опыты по определению усталостной стойкости микроструктуры КСМ на примере многократного увлажнения и высушивания цементного неуплотненного и уплотненного камня. Опыты проводились с использованием цемента Ольшанского завода с размером зерен $d_0 \approx 20$ мкм. В качестве наполнителей использовался кварцевый и шлаковый наполнитель, рассеянный на определенные фракции. Количество наполнителя составляло до 40 % от массы цемента. Контролировались прочность на растяжение при изгибе R_{pu} , прочность при сжатии $R_{сж}$ образцов размером 4x4x16 см после определенного количества циклов.

Через каждые пять циклов определялась длина поверхностных трещин и ее приращение. Для этого образцы перед определением длины трещин увлажнялись в водном растворе тонина по методике []. Ширина раскрытия обнаруженных трещин фиксировалась при помощи измерительного микроскопа УИМ-21. Рисунок трещин наносился тушью. Длина обнаруженных трещин определялась при помощи курвиметра с точностью до 0,001 м.

Преимущество предложенного метода обнаружения поверхностных трещин по сравнению с другими состоит в том, что метод позволяет: - обнаруживать трещины с шириной раскрытия от 1...5 мкм и выше; - рисунок трещин достаточно устойчив к многократному увлажнению и высушиванию; - один и тот же образец можно использовать для поэтапного определения поверхностных трещин до 25...30 раз, что позволяет без применения разрушающих методов изучить кинетику накопления поверхностных трещин; - проникая в трещины, водный раствор тонина, окрашивает берега, что позволяет после разрушения оценить длину трещин и обнаружить трещины на поверхностях разрушения. Стойкость оценивали по коэффициенту стойкости $K_{ст}$ – отношение R_{pu}^n после определенного количества циклов n к прочности на растяжение при изгибе на 28-е сутки нормального хранения R_{pu}^{28} , $K_{ст} = R_{pu}^n / R_{pu}^{28}$.

Цикл начинался с увлажнения в питьевой воде высушенных до постоянной массы образцов. В образцах-представителях увлажнение проводилось в водном растворе тонина для обнаружения поверхностных трещин. Высушивание образцов происходило при $T = 323$ К в потоке воздуха при скорости $V_B = 10$ м/с и относительной влажности $\phi_{от} = 60\%$.

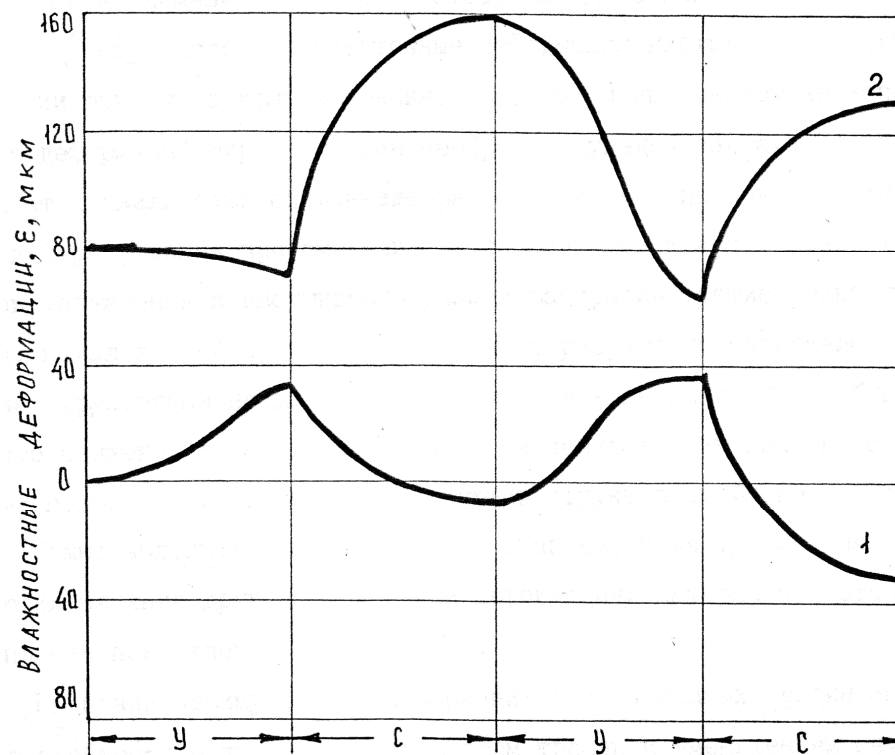


Рис.6.14. Изменение деформаций образца (1) и ширины раскрытия трещин (2) при увлажнении и высушивании образца из цементного камня.

На начальном этапе определялись деформации набухания и усадки образцов из цементного камня с начальным В/Ц = 0,28. При помощи микроскопа УИМ-21 определялись усадка образцов и изменение ширины раскрытия трещин при увлажнении и высушивании.

Опыты показали, что при увлажнении образца происходит увеличение его линейных размеров, (кривая 1, рис. 6.14).

Увеличение линейных размеров сопровождается смыканием обнаруженных поверхностных трещин. При увеличении длины образца к концу цикла на 25 мкм (или 0,15 мм/м) суммарная величина смыкания трещин составляет 10 мкм (или 0,06 мм/м). Смыкаются не только трещины, расположенные перпендикулярно оси 00, но и трещины параллельны ей. Структурный блок,

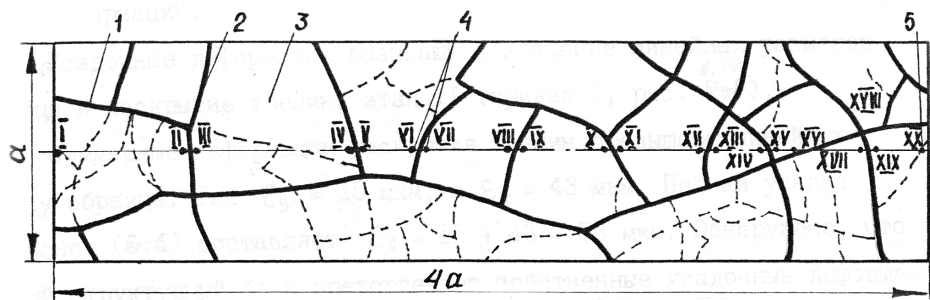


Рис. 6.15. Характер трещинообразования образцов при увлажнении и высушивании.

1 – технологические трещины; 2 – репера для определения усадки и ширины раскрытия трещин; 3 – структурный блок; 4 – структурные блоки, возникшие при усталостной нагрузке; 5 – новая сеть трещин.

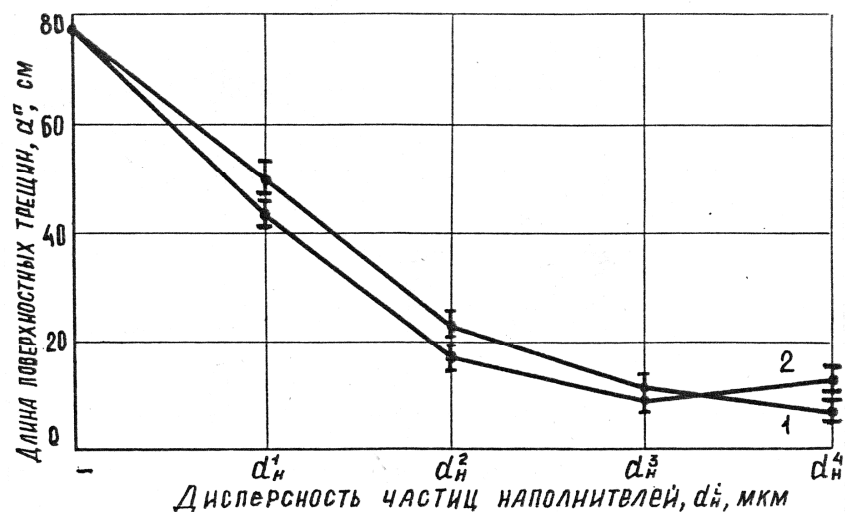


Рис. 6.16. Влияние дисперсности и количества кварцевого наполнителя на начальную длину поверхностных технологических трещин.

1 – 20% наполнителя по массе; 2 – 40% наполнителя по массе.

ограниченный трещинами, при своем увлажнении увеличивается в объеме. Аналогичные процессы протекают в соседних структурных блоках. Это ведет к

уменьшению расстояния между ними, или к смыканию трещин. Этап увлажнения заканчивается после стабилизации деформаций.

Усадочные деформации вызывают сокращение линейных размеров образца и раскрытие трещин, этап II (кривая 2, рис.6.14).

Суммарные деформации раскрытия трещин превышают линейную усадку образца. Так $\epsilon_y = 15$ мкм, а $\epsilon_r = 43$ мкм. Полная усадка составляет $\epsilon_0 = 15 + 43 = 58$ мкм. Обнаружено, что каждый структурный блок претерпевает собственные усадочные деформации. После стабилизации усадочных деформаций начинался следующий цикл влажностных воздействий.

Качественная картина развития деформаций увеличения и уменьшения линейных размеров образца и ширины раскрытия трещин сохраняется при последующих циклах увлажнения и высушивания. Изменяются абсолютные значения деформаций. Обращает на себя внимание появление остаточных деформаций, обнаруженные в работе []. Подобные остаточные деформации наблюдаются и при изменении ширины раскрытия трещин. С каждым новым циклом знакопеременных деформаций ширина раскрытия трещин необратимо увеличивается. Это подтверждает сделанный ранее вывод о наличии пластического деформирования при смыкании и при развитии трещин. После трех циклов увлажнения и высушивания размах раскрытия трещин резко уменьшился. Начался иной процесс усталостного разрушения материала на уровне структурной неоднородности "вязущее - наполнитель". Обнаружено, что снижение размаха раскрытия и смыкания трещин связано с появлением новых трещин внутри существующих структурных блоков, рис. 6.15.

Можно выделить в нашем случае, этап развития трещин, не оказывающих влияние друг на друга при деформациях материала и этап накопления поврежденных в объеме КСМ.

На этапе преимущественного развития независимых трещин снижение стойкости можно связать с ростом трещин и уменьшением сечения нетто образца. Отличительной особенностью усталостного разрушения является деформационный механизм развития трещин с наложением энергетического уровня концентрации деформаций и напряжений в вершине трещины, т.е. можно говорить о смешанном деформационно-энергетическом механизме усталостного роста трещин. По мере развития независимых трещин каждый структурный блок постепенно изолируется от соседних. Происходит сравнительно независимое деформирование полиструктурного блока в силу того, что каждый такой блок сам является сложноорганизованным по типу "блок в блоке" или "структура в структуре".

Между структурными подблоками генетически заложены поверхности

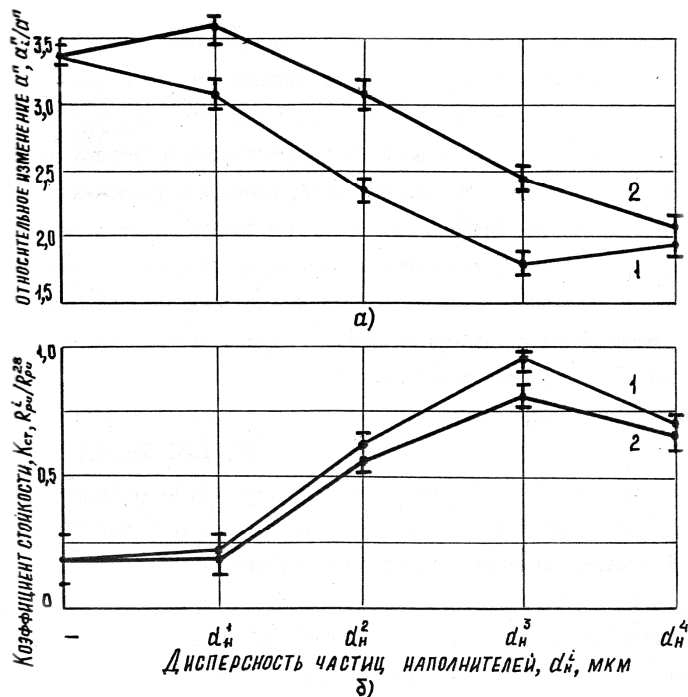


Рис. 6.17. Влияние дисперсности и количества кварцевого наполнителя на изменение поврежденности (а) и стойкости (б) цементного камня при знакопеременных деформациях набухания и усадки.

1 – 20% наполнителя по массе; 2 – 40% наполнителя по массе.

раздела. При локализации деформаций внутри блоков происходит перераспределение деформаций между составляющими блок структурами. Взаимодействие таких структур осуществляется через межкластерные ПР. Знакопеременные деформации способствуют превращению межкластерных ПР в трещины. Возникшие трещины начинают воспринимать объемные деформации своих подблоков. Происходит рассеивание деформаций на больших площадях поверхностей раздела. Это вызывает кажущееся уменьшение деформаций первичного блока. Такой первичный блок можно рассматривать как "самостоятельный" образец, внешнее деформирование которого отличается от индивидуальных деформаций, составляющих его

подблоков. По мере увеличения количества циклов знакопеременных деформаций происходит дробление подблоков на свои структурные элементы.

"Рисунок" трещин внутри первичных блоков повторяет "рисунок" начальных технологических трещин на поверхности образца. Можно утверждать, что в

результате многократных объемных изменений произошло развитие трещин на более низком масштабном уровне. Поверхность разрушения образцов проходит по межблочным поверхностям раздела. Это позволяет заключить о фрактальности структуры КСМ [].

Увеличение количества циклов увлажнения и высушивания вызывает увеличение протяженности поверхностных трещин, рис. 6.16.

Протяженность трещин определяли в см по трем граням образца. Изменение протяженности поверхностных трещин выражали через безразмерный коэффициент k_T относительного прироста длины трещины, с учетом ее начальной длины a_0 и длины через определенное количество циклов a_n , $k_T = a_n / a_0$.

Увеличение протяженности поверхностных трещин является своеобразным отпечатком внутренних процессов накопления повреждений в структуре материала. Это видно по изменению коэффициента поврежденности в зависимости от усталостного нагружения, рис. 6.17.

Коэффициент стойкости цементного камня составил $K_{ст} = 0,21$.

Таким образом, усталостное разрушение микроструктуры КСМ связано с развитием трещин. Технологические трещины являются первичным концентратором начала разрушения микроструктуры КСМ. Развитие усталостных трещин проходит по межкластерным границам раздела, что подтверждается общим "рисунком" трещин при изменении поврежденности образца. Знакопеременные деформационные процессы вызывают накопление повреждений внутри материала, качественное изменение самих трещин, снижение стойкости микроструктуры образцов в условиях усталостного нагружения.

Механизм развития усталостной трещины в наполненной микроструктуре может быть описан как с позиций взаимодействия фронта трещины с частицами наполнителя, так и с позиций притупления острого устья трещины при ее выклинивании на частицу наполнителя.

В силу того, что распространение трещины в материале происходит через движение ее фронта, то деформационные процессы будут зависеть от общей протяженности фронта и глубины его продвижения, или длины трещины. Кроме того, величина объемных деформаций определяется структурой материала - размером и количеством в блоке блоков. В нашем случае можно выделить следующие механизмы движения фронта трещины в микроструктуре блочного строения:

1. В случае активных частиц наполнителя, $F_n \geq F_э$, они являются структурообразующими центрами и располагаются внутри блочных структур. При малоцикловых объемных знакопеременных деформациях такие трещины будут развиваться путем слияния.

Дробление кластеров высшего масштабного уровня К-N на блоки более низкого масштабного уровня происходит по внутрикластерным ПР. Частицы наполнителя остаются внутри структурных блоков. Поэтому для случая $F_n \approx F_3$ при малоцикловых объемных изменениях усталостная трещина практически не взаимодействует с частицами наполнителя. Механизм роста таких трещин определяется структурной наследственностью или технологической поврежденностью.

2. Для случая $F_n \ll F_3$ частицы наполнителя располагаются, как правило, в периферийных зонах кластеров К-1, К-2... К-N. Кроме того, одна и та же частица наполнителя может принадлежать двум соседним кластерам. Поэтому для случая $F_n \ll F_3$ взаимодействие фронта трещины с частицами наполнителя является неизбежным. При этом на механизм и кинетику развития усталостных трещин размер частичек наполнителя влияет следующим образом: при $d_n/d_3 = 1$ частицы дезорганизуют структуру материала и повышают начальную поврежденность, что практически не должно сказываться на кинетике роста трещин усталости; увеличение размера частиц наполнителя до $d_n/d_3 = 5...10$ упорядочивает начальную и последующие структуры, снижает поврежденность материала и ведет к сдерживанию продвижения фронта трещины; увеличение размера частиц $d_n/d_3 \gg 20$ вызывает появление поля деформаций и, затем, напряжений в матричном материале, что способствует инициированию технологических и усталостных трещин.

Опыты показали, что введение наполнителей изменяет протяженность поверхностных трещин, **рис. 6.17.**

Минимальной поврежденностью для кварцевого наполнителя обладают образцы с 20% по массе наполнителя с размером $d_n/d_3 = 8...10$. Суммарная протяженность поверхностных трещин таких образцов в 1,9 раза меньше протяженности трещин образцов с 40% наполнителя крупностью $d_n = 20$ мкм.

Изменение начальной поврежденности вызывает различную кинетику усталостных трещин.

Минимальным количеством поверхностных трещин характеризуются образцы с наполнителями размером частиц d_3^H и d_4^H . Это соответствует минимальной поврежденности технологическими трещинами. При циклических воздействиях подобная закономерность влияния размера частиц наполнителя на кинетику приращения длины поверхностных трещин сохраняется. Повышение поврежденности ведет к снижению стойкости микроструктуры, **рис. 6.17.б.**

Опыты показали, что максимальной стойкостью, $K_{ст} \approx 1$, обладают образцы с 40% по массе частицами наполнителя размером d_3^H . Анализ поверхностей

разрушения показал, что при оптимальном размере частиц, на поверхности разрушения появляется "ручейковый узор".

Поверхность разрушения образцов бездобавочного цемента и из цемента, наполненного частицами с размером d_1^H , гладкая, без ручейков и ступеней. Это свидетельствует о том, что частицы наполнителя неоптимального размера не сдерживают рост усталостной трещины, в результате чего стойкость микроструктуры снижается.

Применение в качестве наполнителя частиц шлака различной дисперсности подтвердил вывод о влиянии размеров частиц наполнителя на стойкость цементного камня в условиях многократного увлажнения и высушивания. Максимальной стойкостью, $K_{ст} = 0,67$, обладают образцы с частицами шлака $d_n = 130$ мкм. Анализ показал, что $K_{ст}$ зависит не столько от количества шлаковой составляющей, сколько от размера частиц шлака.

Проведенные исследования показали, что технологическая поврежденность микроструктуры КСМ определяет условия развития в ней усталостных трещин и, следовательно, стойкость в условиях многократных знакопеременных объемных изменений. Направленное структурообразование при помощи наполнителей оптимальных вида, количества и дисперсности позволяет свести к минимуму количество наследственных дефектов. Опыты показали, что наполнители оптимальной крупности сдерживают накопление дефектов в микроструктуре, изменяют условия зарождения и распространения трещин усталости и повышают стойкость наполненного цементного камня в условиях многократного увлажнения и высушивания.

6.5. Влияние технологической поврежденности на разрушение конструкций

Технологические трещины – составная часть структуры материалов во многом определяют как их физико-технические свойства, так и конструкций из них.

В конструкциях всегда присутствуют технологические дефекты, при этом часть их ориентирована в наиболее опасных направлениях. Наличие технологических трещин в значительной степени определяет несущую способность конструкции, работу материала в ней, трещинообразование и характер разрушения. Для подтверждения этого изучали характер разрушения железобетонной балки с учетом технологической поврежденности. Балку размером 10x15x120 см изготовили из бетона пределом прочности при сжатии 36,1 МПа. Расход цемента 390 кг/м³. Схемы армирования и нагружения представлены на **рис. 6.18.а.**

После твердения в нормальных условиях в течение 28 суток был определен характер распределения наследственных поверхностных трещин (рис. 6.18.в). Рисунок технологических трещин на поверхности железобетонной балки не отличается от трещин на образцах из цементного камня, что свидетельствует о типичности технологической поврежденности композиционных материалов и конструкций на неорганических вяжущих. Нагружали балки ступенями по 0,1 $Q_{разр}$ с выдержкой в течение 5 мин. При этом контролировали момент появления и развитие трещин под нагрузкой, ширину их раскрытия, прогибы в процессе нагружения.

Анализ характера трещинообразования железобетонной балки показал, что вертикальные и наклонные трещины, возникшие под воздействием внешней нагрузки, проходят по границам раздела структурных блоков (повторяют конфигурацию технологических трещин) (рис.6.19). Это подтверждает существование ослабленной зоны на границах раздела между структурными блоками. Разрушающая (магистральная) трещина проходит по этим границам раздела и делит конструкцию на самостоятельные части (рис. 6.19. в, е). Характер разрушения образцов и конструкций позволяет предположить, что под действием внешних нагрузок происходит перераспределение деформаций и напряжений между отдельными структурными блоками. При этом в зависимости от их общего и местного распределения, отдельные блоки могут деформироваться или изменять ориентацию так, что часть границ раздела смыкается. Это может привести к

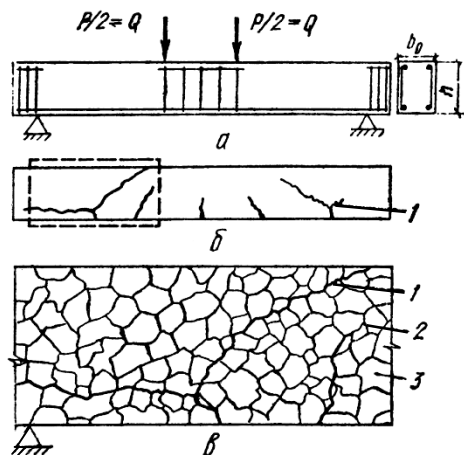


Рис. 6.18. Схема нагружения (а) и характер трещинообразования (б, в) железобетонных балок

1- силовые трещины; 2 – технологические трещины; 3- структурные блоки.

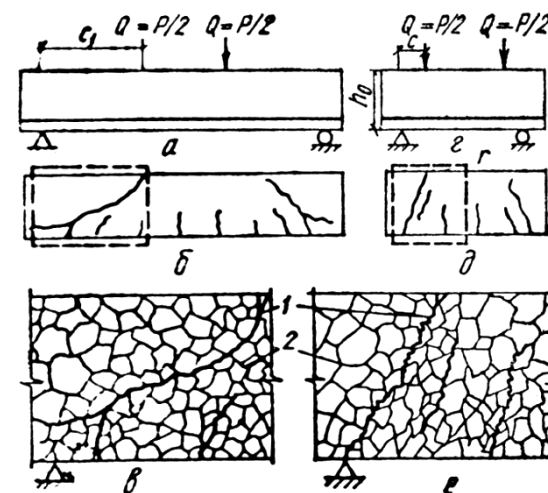


Рис. 6.19. Влияние технологической поврежденности и геометрических параметров на характер разрушения конструкций

а, г – $c/h_0 = 0,5$; $c_3/h_0 = 3$ – соответственно; б, д – характер разрушения балок; в, е – влияние начальной поврежденности материала на траекторию развития наклонных трещин;

1 – наклонная трещина; 2 – технологические трещины.

эффекту зацепления смежных берегов трещины и замедлить ее рост. Разнонаправленные деформации смежных блоков ведут к увеличению ширины раскрытия и интенсифицируют рост магистральной трещины.

Анализ поверхности разрушения показал, что преимущественное развитие имеет магистральная трещина. Это может быть связано с ее релаксирующим действием и с общим перераспределением напряженно-деформированного состояния конструкции или ее части под влиянием трещины. Обращает на себя внимание микротраектория магистральной трещины – при сохранении общего направления она растет по технологическим поверхностным дефектам. Это дает основание предположить, что, управляя технологической поврежденностью, можно изменять условия, кинетику роста и микротраекторию магистральных трещин.

Таким образом можно заключить, что физико-технические свойства композиционных строительных материалов и конструкций в значительной степени определяются их технологической поврежденностью. В период технологической переработки материал приобретает дефекты, которые являются составной ча-

стью структуры образца и конструкции. Технологические дефекты определяют местное напряженно-деформативное состояние конструкции, характер трещинообразования и поверхность разрушения. Направленное изменение технологической поврежденности позволит управлять физико-техническими свойствами материалов, характером трещинообразования и разрушения конструкций.

"Идея взаимосвязности всех наук порождает неудовлетворенность единственным познанием"
(Карл Ясперс "Истоки истории и ее цель")

7. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗЕ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ

7.1. Основы системного подхода

Согласно / / под системным подходом понимается направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем; ориентирует исследователей на раскрытие целостности объекта, на выявление многообразных типов связей в нем и сведение их в единую теоретическую картину. В свою очередь, система (от греч. *systema* – целое, составленное из частей; соединение), множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство.

Общая теория систем выделилась в самостоятельное научное направление, связанное с разработкой совокупности философских, методологических, конкретно-научных и прикладных проблем анализа и синтеза сложных систем произвольной природы / /.

По мнению Тейяр де Шардена П. (1881 – 1955 г.г.) / , с.274/ "современная наука, которая некогда чрезмерно, вплоть до впадения в заблуждение поддавалась обаянию анализа, ныне вновь привыкает рассматривать эволюционно творческую функцию синтеза. Она начинает видеть, что в молекуле заключено больше, чем в атоме; в клетке больше, чем в молекулах... На каждой последующей ступени комбинации *выступает нечто* несводимое к отдельным элементам...". Представления Тейяр де Шардена перекликаются с представлениями Аристотеля, который указывал, что целое больше суммы своих частей. На наш взгляд, в данном случае уместно привести цитату, приведенную в работе Л.Н.Гумилева / , с.32/ "Вы никогда не узнаете, на что похожа мышь, если будете тщательно изучать ее отдельные клетки под микроскопом, так же не поймете прелести готического собора, подвергая каждый его камень химическому анализу".

Несмотря на приведенные в энциклопедических словарях определения понятия "система", обзор литературных источников показал, что в настоящее время устоявшегося определения нет / / . Например, в работах / / под системой понимается совокупность взаимосвязанных элементов, которые объединены

единством цели и функциональной целостности, и при этом свойство самой системы не сводится к сумме свойств элементов. При этом следует отметить, что, как указано в работе А.Рапопорта / /, никакого сознательного стремления к целям системе приписывать не следует. Под "целью" в данном случае следует понимать некоторое конечное состояние, к которому стремится система в силу своей структурной организации. Согласно системному подходу Л. Бергаланфи / / система представляет собой комплекс элементов, которые находятся между собой во взаимодействии. В работе / / отмечается иерархический принцип строения систем из единиц, группировка которых имеет самостоятельное значение, звенья, блоки, подсистемы, каждая из которых является единицей низшего порядка. По / / система – совокупность элементов обладающих следующими признаками: а) связями; б) свойствами, отличными от свойств отдельных элементов совокупности. А.Д.Холл и Р.Е.Фейджин / / под системой понимают множество объектов вместе с отношениями между объектами и между их атрибутами (свойствами). При этом они оговаривают, что это определение недостаточно четко и не претендует на то, чтобы быть определением в математическом или философском смысле слова. По мнению Р.Л.Акофа / / систему можно определить как любую сущность, концептуальную или физическую, которая состоит из взаимозависимых частей. С.С.Сенгупта и Р.Л.Акоф / / представляют систему как множество действий (функций), связанных во времени и пространстве множеством задач по принятию решений и оценке поведения.

В.Д. Могилевский / / приводит следующие определения системы: 1) система есть особая организация специализированных элементов, объединенных в единое целое для решения конкретной задачи. Основное качество организации системы (целостность) заключается в несводимости ее свойств к свойствам элементов и наоборот. 2) система – есть философская категория, характеризующая организацию материи и духовного мира человека.

Представление системы как философской категории предполагает специфику системного подхода, базирующегося на системном мышлении. По И.В. Прангишвили / /, с.31/ "...системное мышление – привычка мыслить так, чтобы видеть целостную картину, при этом опираясь на различные теоретические модели и целостное интуитивное видение сложных объектов". При этом отмечается, что при общем преобладании интуиции в системном мышлении используется как методы индукции (от лат. induction – наведение – умозаключение от фактов к некоторой гипотезе, общему утверждению), так и дедукции (от лат. deductio – выведение – вывод по правилам логики; цепь умозаключений, звенья которой связаны отношением логического следования) / /. Иными словами, индукция предполагает нахождение определенных закономерностей, а дедукция – использование обнаруженных закономерностей в частных случаях.

Системному мышлению присуща вся совокупность методов и способов анализа, описания, исследования и конструирования систем. Объективное существование индуктивных и дедуктивных методов анализа систем предполагает некоторую (иногда существенную) внутреннюю противоречивость и парадоксальность системного мышления. Это связано с тем, что при анализе выделенного объекта как системы ставится задача исследования его как определенной целостности. В тоже время необходимо, для определения условий формирования заданной целостности, рассмотреть составляющие данную систему элементы. При этом следует учитывать, что характерные свойства системы не аддитивны свойствам ее составляющих. Специалисты / / к парадоксам системного мышления относят парадокс целостности системы и парадокс ее иерархичности. К парадоксам системного мышления можно отнести несистемные по своей сути методы, способы, представления, понятия, терминологию, принятые в рамках существующей парадигмы. Предполагается, что дальнейшее развитие системного подхода будет опираться на формирование системного мышления через накопление, обобщение и развитие методов анализа сложных объектов как систем.

Системный подход к исследованию самых разнообразных объектов, включая технические, предполагает выполнение следующих процедур: - выделение объекта исследований как системы с установлением ее элементов, структуры и функции; - определение основных критериев целесообразного действия системы и принятие основных допущений и ограничений; - определение главных факторов, влияющих на систему; - принятие модели системы; - оптимизация действий системы по достижению цели; - создание схемы управления системой; - обеспечение безопасности функционирования системы / /.

В работе / / выделяется четыре основных признака, наличие которых позволяет рассматривать объект исследований как систему:

- 1 – целостное образование совокупности элементов;
- 2 – наличие устойчивых связей (отношений) между элементами системы;
- 3 – наличие интегративных свойств системы. Интегративные свойства системы проявляются в несводимости свойств системы к индивидуальным свойствам ее элементов;

4 – наличие в системе определенной организации (структуры) которая обеспечивает согласованное функционирование элементов системы.

При системном подходе неизбежно возникает вопрос классификации систем. В самом общем случае специалисты выделяют четыре класса систем / /.

Искусственные системы - это системы, создаваемые людьми в процессе практической деятельности (материалы, механизмы, комплексы, социальные группы и т.п.).

Естественные системы – это системы, существующие в живой и неживой природе и обществе.

Идеальные и концептуальные системы – это системы, которые выражают образцовую действительность к которой должна стремиться реальная система.

Виртуальные системы – это системы, которые не существуют в действительности (модельные или мыслительные представления реальных объектов, явлений, процессов, механизмов проявления и т.п.).

Кроме того системы могут быть целеориентированными (имеющими четкую цель) и ценностноориентированными с приоритетом достижения определенной ценности, а не цели.

Системный подход предполагает существование методов описания систем, что диктуется необходимостью их исследования и анализа. В данном случае, по нашему мнению, возникают определенные трудности, аналогичные с трудностями и неопределенностями при определении границ и способов описания структуры. Представляется, что при описании системы, как и структуры, следует принять (разработать, создать) ее модель. Это важно еще потому, что принятие модели является необходимым принципом представления объекта исследований в виде системы.

В силу того, что система по определению является достаточно сложной и многогранной, то при ее изучении требуется множество моделей. Ограничением по количеству моделей может служить функциональное назначение системы с определением основных требуемых свойств. Это обуславливает степень детализации моделей, что предопределяет "глубину" изучения системы. Как и при моделировании полиструктурного материала для описания системы как некоторой целостности (интегральной структуры) требуется принять модели элементов системы (локальных структур, образованных по несхожим механизмам). При этом следует, по возможности, учитывать тот факт, что свойства системы определенным образом формируются путем взаимодействия ее элементов (подсистем), уровень свойств которых отличается как между собой, так и от свойств системы.

По мнению специалистов / / общее, содержательное описание системы является вербальным. Смысл его состоит в установлении неформализованных структурных элементов системы и связи между ними. Вербальное описание системы является первым шагом в познании сложных систем. Оно позволяет определить составляющие системы, которые обеспечивают проявление требуемых свойств. Таким образом выявляется структура системы как совокупность достаточно самостоятельных по тому или иному принципу элементов. Продолжает наблюдаться некоторая аналогия связи свойств сложноорганизованных материалов с их структурой и свойств системы с ее структурными особенностями.

ми. В литературе приводится достаточно много определений понятия "структура" системы / / . Для сложных систем в понятие структуры системы вводят иерархию ее подсистем. Отмечается, что практически для любых систем можно выделить структурный элемент, под которым понимают наименьшую часть системы, поведение которой еще подчиняется структурным закономерностям системы. При этом сам структурный элемент может содержать свои собственные структурные элементы / / . Наблюдается, по нашему мнению, своеобразная полиструктурная организация сложных систем, что обеспечивает их целостность.

В работе / / организация систем делится на структурную и функциональную. Структурная организация систем предопределяется ее типом, структурными элементами, их распределением, способами связи и соподчинением. Функциональная организация систем связана с порядком выполнения системой действий, направленных на выполнение ближайших и долговременных целей. Подобное разделение связано с тем, что однотипная структура может обеспечить множество функций системы. Организация структуры системы (системогенез) начинается с задания ее функции. Под эту функцию конструируется и апробируется множество типов структур, пока не будет достигнуто наилучшее взаимодействие "структура – функция", "структура – свойства". Модели подобного типа предопределяют применение прогностических (футурологических) методов описания.

В отдельный класс специалисты относят концептуальные модели / / . Концептуальные модели позволяют перейти к количественному описанию системы. Использование математических моделей ведет к наполнению вербальных и концептуальных моделей (качественное описание систем) математическим содержанием (количественное описание).

Приведенная краткая информация позволяет заключить, что системный подход, основанный на системном мышлении, дает возможность представить многие технические объекты как системы. Анализ показывает, что их функционирование как некоторой целостности подчиняется системным законам и закономерностям. При этом целостность объекта предопределяется его дискретным строением и, что особенно важно, уровнем и характером взаимодействия составляющих элементов. Для прогнозирования свойств объекта как системы, как показывает проведенный анализ, недостаточно знать свойства отдельных составляющих. Взаимодействие структурных элементов системы порождает проявление иного уровня свойств их содружества. Применение различных моделей при описании механизмов (способов) взаимодействия позволит направленно синтезировать систему (объект) с требуемыми свойствами, определить структурные элементы, которые обеспечивают не только проявление данных свойств, но и их

сохранение в нормируемый период функционирования системы. Для этого следует обоснованно определить вид системы, которая наиболее адекватно позволяет представить конкретный технический объект.

7.2. Краткие сведения о системах различного вида

Помимо общего выделения систем по их "происхождению" (естественные и искусственные) системы могут быть классифицированы по следующим признакам:

- по взаимодействию со средой (другими системами) системы делятся на закрытые и открытые;
- по структурным характеристикам системы делятся на гомогенные (однородные, жесткие), гетерогенные (разнородные, корпускулярные) и смешанные;
- по состоянию системы можно разделить на равновесные (уравновешенные) и неравновесные (неуравновешенные);
- по функциональным особенностям системы могут быть детерминированными (прогнозируемыми в любой момент времени) и вероятностными;
- по степени сложности системы делятся на простые, сложные и очень сложные;
- по управлению выделяют системы простые, сложные и сверхсложные в управлении;
- по целенаправленности выделяются системы с определенной неизменяющейся целью и системы в которых формирования и изменение целей происходит в зависимости от условий функционирования системы / /.

Под закрытыми системами (замкнутыми, изолированными) понимают системы, которые не взаимодействуют с окружающей средой и не обмениваются со средой или другими системами веществом, энергией и информацией. Как правило, представления объектов в виде закрытых систем используется для анализа определенного типа процессов, происходящих внутри системы за счет собственных внутренних ресурсов (например, термодинамические системы). В силу того, технические объекты находятся в постоянном взаимодействии со своим окружением (средой, другими объектами), то представлять их в виде закрытых систем нецелесообразно. Поэтому в дальнейшем нашем анализе закрытые системы, их структура и свойства рассматриваться не будут.

Открытые системы представляют собой системы, которые взаимодействуют с окружающей средой и с другими системами веществом, энергией и информацией. Причиной такого обмена можно считать неравновесное состояние

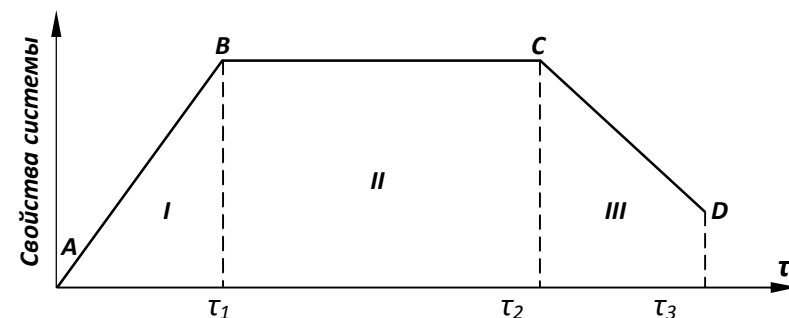


Рис.7.1. Принципиальная схема "жизни" системы.

AB – создание системы; BC – активная фаза выполнения основных функций системы; CD – деградация и гибель системы; I, II, III – этапы различного состояния системы.

систем как внутри самой себя (между отдельными подсистемами и между структурными элементами каждой образующей систему подсистемы), так и при взаимодействии с другими системами. Существование неравновесного состояния предполагает мобильность структурных параметров при внешних воздействиях, что должно обеспечить целенаправленное функционирование открытой системы в заданный период времени. В общем случае выделяют три этапа существования открытых систем / /, рис.7.1.

Первый этап характеризует создание и становление (развитие) открытых систем. Основными критериями развития можно считать увеличение порядка и рост организованности всей совокупности элементов системы. В этот период происходит, как правило, образование ансамбля структурных элементов, их развитие и взаимодействие, что способствует проявлению новых функциональных качеств. На этом этапе становления системы целесообразно говорить о ее *самоорганизации*. Более подробно о явлениях самоорганизации в КСМ и конструкциях на их основе будет изложено в последующих разделах.

В результате спонтанных процессов внутренней перестройки на этапе развития система приобретает структуру, которая должна обеспечить выполнение системой заданных ей функций. Начинается период "зрелости" (стабильности) системы (участок кривой $B-C$, рис.7.1.). В этот период система должна выполнять свою целевую установку при обеспечении заданного (нормируемого) уровня свойств. В силу постоянного взаимодействия с окружающей средой в системе могут возникать кризисные ситуации, что может вывести ее из равновесного состояния. Поэтому, для обеспечения безопасного выполнения основных функций (обеспечение устойчивости), система должна обладать свойствами *адаптации*. Способность открытых систем адаптироваться к постоянно изменя-

ющимся внешним воздействиям будет рассмотрена ниже. В общем случае безопасное функционирование систем связывают с возможностью сохранения ее гомеостаза / / . Гомеостаз (от греч. *homoios* – подобный, одинаковый и *stasis* – неподвижность, состояние) относительное динамичное постоянство состава и свойств внутренней среды. Понятие гомеостаза применяют в генетике и кибернетике / / . Как правило, гомеостаз не является конечной целью системы, а лишь средством для выполнения основных функций при взаимодействии системы с внешней средой. Иными словами, гомеостаз предполагает наличие в сложных системах структурных составляющих, которые обеспечивают их самосохранение (устойчивость) в период функционирования. Подобные структурные составляющие можно, по нашему мнению, рассматривать как гомеостатические. В литературе отмечается, что безопасное функционирование системы связано с сохранением ее гомеостаза при взаимодействии системы и среды / / . При этом выделяют внутреннюю и внешнюю безопасности системы. Под *внешней* безопасностью понимают способность системы взаимодействовать со средой без нарушения ее гомеостаза. Способность системы поддерживать свое нормальное функционирование за счет сохранения своей целостности определяет *внутреннюю* безопасность системы.

В процессе эксплуатации система, как под действием эксплуатационных нагрузок, так и в результате внутренних структурных спонтанных перестроек, может потерять устойчивость. Это может привести к снижению функциональных характеристик, что свидетельствует о переходе к третьему этапу существования системы – к ее деградации или упадку (участок кривой *C-Д*, рис.7.1.).

Искусственные системы создаются для выполнения заданной им цели в требуемый период времени. Поэтому деградация системы должна наступить не раньше, чем система закончит свое активное функционирование. Способность открытых систем сохранять основные структурные элементы, обеспечивающие выполнения заданных функций в условиях взаимодействия с окружающей средой в течение нормируемого времени эксплуатации закладываются в период создания и становления искусственной системы. При этом следует отметить, что сравнительно небольшой временной интервал становления системы в значительной степени предопределяет весь достаточно длительный период ее существования ($t_1 \ll (t_2 + t_3)$, рис.7.1.).

Это ставит задачу анализа и изучения периода становления искусственных открытых систем, который можно, применительно к КСМ и конструкциям из них, отнести к *технологическому* периоду.

Технологический период получения материала и оформления его в требуемые конструктивные формы включает в себя, по нашему мнению, следующие этапы:

- формулирование цели создания системы с требуемым набором функций;
- выбор модели системы с учетом возможных вариантов ее взаимодействия с окружающей средой в период эксплуатации;
- выделение структурных элементов, которые должны обеспечить безопасность системы в период ее активного функционирования;
- выбор исходных составляющих материала с учетом их качественного состава и количественных соотношений и назначение технологических условий получения материала с требуемым набором структурных элементов;
- назначение технологических режимов получения собственно системы с требуемым набором функций.

Первые три предложенных этапа являются, по нашему мнению, одними из определяющих в общем технологическом периоде создания открытых систем. В данном случае речь идет не столько о продолжительности этих периодов, сколько об их информационной насыщенности. Под информационной насыщенностью мы понимаем индивидуальную способность, как отдельного исследователя, так и исследовательских коллективов, представить объект как систему определенного вида с выделением структурных составляющих, ответственных за проявление требуемых свойств. При этом следует учитывать свойства исходных компонентов и их трансформацию в свойства материала и конструкции (технологические регламенты). Таким образом, конкретный исполнитель (создатель системы) является необходимым и доминирующим элементом в общем цикле создания искусственных систем.

Предложенный подход, включающий человека как базового элемента создания искусственных систем, нельзя считать новым и оригинальным. В литературе достаточно подробно описано влияние личности на формирование мировоззренческих и социальных систем / / , самых разнообразных произведений искусства как целостных систем / / , технических систем различных видов и назначений / / .

Можно привести примеры представления строительных материалов как искусственных строительных конгломератов (ИСК) / / , композиционных строительных материалов с полиструктурной организацией / / , стохастических систем / / , грубодисперсных систем / / и т.п. Каждая из предложенных моделей описания строительных материалов отражает позицию и подход конкретного исследователя. В последующем происходит отторжение модели от конкретного исследователя путем дальнейшей ее интерпретации последователями принятого направления в рамках определенной парадигмы.

Таким образом, общим элементом искусственных систем различных видов и назначения, является субъект. Субъективный фактор присутствует на всех

этапах существования системы – от ее замысла и создания активной работы до деградации и гибели.

Проведенный анализ позволяет заключить, что выделенный для изучения и анализа объект может быть представлен системами различных видов. Субъективный характер проектирования структуры системы должен быть основан на учете достаточно большого количества факторов, влияющих на организацию системы и на ее способность выполнять заданную целевую функцию.

7.3. Композиционные строительные материалы и конструкции как сложные открытые системы

В качестве объекта исследования и анализа принята строительная конструкция. Прежде чем представить строительную конструкцию как систему определенного вида и целевого назначения следует отметить, что она сама является составной частью более сложной системы. Свойства и ее целевое функционирование назначаются с учетом свойств, взаимодействия и взаимовлияния конструкций различных видов друг с другом. При этом обязательно, по нашему мнению, следует учитывать взаимодействие всей системы и ее структурных элементов с внешней средой. Принципиальная схема подобной системы представлена на рис.7.2.

Из схемы видно, что с внешней средой взаимодействует сама выделенная система как некоторая целостность и ее структурные элементы. При этом следует учитывать взаимовлияние системы на ее составляющие и взаимодействие структурных элементов между собой. Поэтому к внешним воздействиям на структурные элементы и их группы следует отнести и их взаимовлияние друг на друга.

Из этого следует, что каждая конструкция является подсистемой более сложной системы (например, здания или сооружения). В тоже время каждая конструкция должна отвечать определенным требованиям, что должно обеспечить целостность более сложного объекта. Обеспечение целостности связано с проявлением интегративных свойств данного объекта как сложной системы путем взаимодействия отдельных конструкций как структурных элементов этой системы. Это свидетельствует о том, что индивидуальные свойства таких структурных элементов зависят от их места и выполняемой функции в системе и, по определению, свойства системы не сводятся к заданным свойствам структурных элементов. Поэтому можно считать важной задачей выделение и изучение факторов, определяющих свойства каждой конструкции. Для этой цели отдельная строительная конструкция представляется как система. В силу того, что

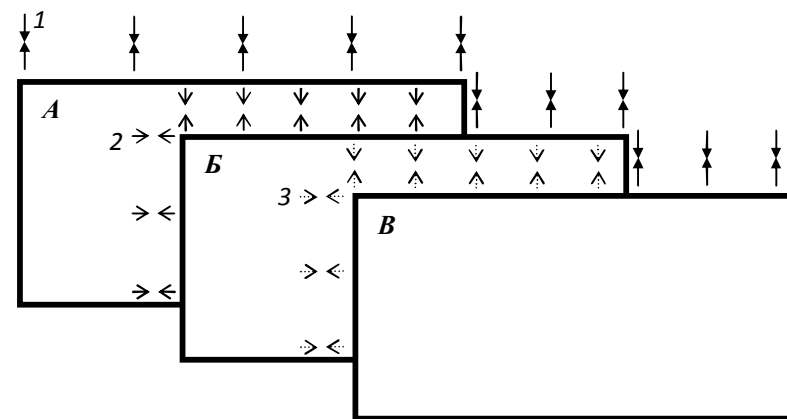


Рис.7.2. Принципиальная схема.

А – сложный объект как открытая система; Б – группа конструкций; B – индивидуальная система; 1 – взаимодействие объекта с внешней средой; 2 – взаимодействие группы конструкций в объекте; 3 – взаимодействие индивидуальной конструкции.

конструкция должна выполнять свои функции через набор определенных свойств, которые зависят от характера внешних по отношению к конструкции воздействий, то ее следует представить как *открытую систему*. Сама строительная конструкция является достаточно сложноорганизованным объектом, что дает основание представить ее как *сложную систему*. Внешние воздействия, к которым можно отнести нормируемые силовые (статические и динамические) нагрузки и нагрузки, связанные с изменением температуры и влажности и агрессивным действием среды эксплуатации, могут вызывать структурные изменения в конструкции. Поэтому ее целесообразно рассматривать как *динамическую систему*.

Таким образом, строительную конструкцию можно представить как *открытую сложную динамическую систему* (ОСДС).

Сложность системы в данном случае определяется не только и столько достаточно большим набором структурных элементов различных по свойствам и назначению, но и уровнем взаимодействия между структурными элементами и их группами, рис.7.3.

Приведенная схема позволяет представить взаимообусловленность различных структурных элементов и отдельных подсистем и их взаимозависимость друг от друга. Создание и становление ОСДС в виде строительной конструкции происходит в технологический период (см. раздел 7.2). В этот период заклады-

ваются основные элементы структуры, которые должны обеспечить всей конструкции нормируемые характеристики и структурные элементы, через изменение которых обеспечивалось бы сохранение заданных свойств в нормируемый период эксплуатации. Определение таких разномасштабных и разнообразных структурных элементов является важной

технологической задачей. Выделенные структурные составляющие должны обеспечить проявления механизмов *самоорганизации* как отдельных структурных элементов и их групп, оформленных в подсистемы различных масштабных уровнях, так и всей системы. Самоорганизация в данном случае должна рассматриваться не только как способ *самосохранения* системы. Явления самосохранения системы не исключают варианты, при которых система, ради сбережения отдельных подсистем или своей целостности, способна изменить намеченные целевые установки. В качестве примера можно привести случаи потери устойчивости строительных конструкций, частичного разрушения, изменение деформативных характеристик и т.п. При этом конструкция может сохранить свою массу, геометрические размеры, отдельные фрагменты (подсистемы) могут не снизить при этом свои физико-механические свойства и т.п. Самоорганизация должна привести к таким структурным перестройкам, при которых способны проявляться явления *адаптации*. При этом адаптация, применительно к материалам на основе минеральных вяжущих, может происходить за счет изменения их качественного и количественного составов / / или за счет изменения (трансформации) структурных элементов и их параметров / /. Проявления свойств адаптации через внутреннюю структурную перестройку (самоорганизацию) обеспечивает внутреннюю безопасность системы и, тем самым, сохраняет ее функциональное назначение. Для определения структурных элементов, которые способны изменять свои параметры под действием комплекса эксплуатационных нагрузок с целью проявления эффектов адаптации, следует рассмотреть *структуру* конструкции. Для этого необходимо принять модель структуры конструкции как ОСДС.

Принятый феноменологический подход не позволяет в полной мере описать модель структуры конструкции. Поэтому следует выделить наиболее существенные элементы структуры, которые обеспечивают сохранение требуемых свойств конструкции в период ее активной службы.

Представим конструкцию как специально оформленный материал. Такое представление позволяет утверждать, что все структурные особенности материала автоматически входят в структуру конструкции и являются ее неотъемлемой частью. В силу того, что структура материала формируется в технологический период, то следует учитывать влияние геометрических особенностей конструкции на формирование свойств материала.

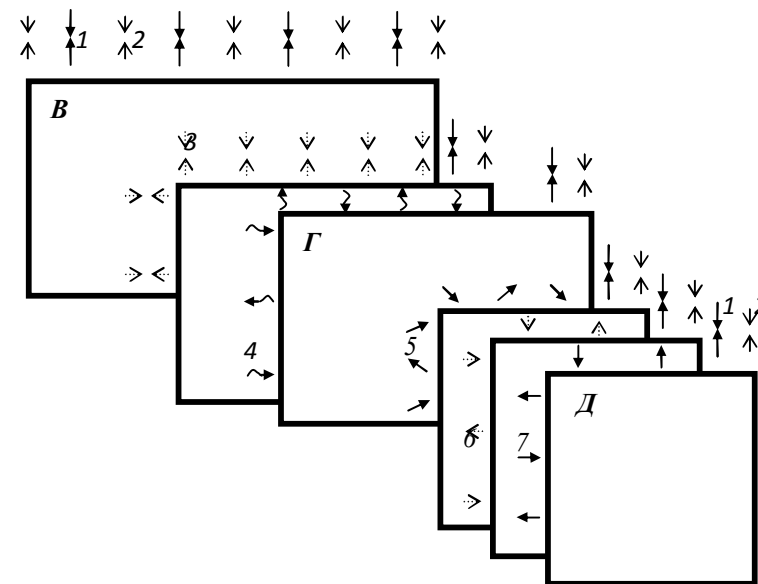


Рис.7.3. Характер взаимовлияния структурных составляющих в конструкции как в ОСДС.

B – индивидуальная конструкция; *G* – подсистемы конструкции; *D* – структурные элементы подсистем; 1 – взаимодействие с внешней средой; 2 – взаимодействие в группе конструкций; 3 – взаимодействие с подсистемами; 4 – взаимодействие подсистем; 5 – взаимодействие подсистемы со структурными элементами; 6, 7 – взаимодействие структурных элементов.

В последнее время многие специалисты отмечают, что в реальных материалах и конструкциях до приложения внешней нагрузки присутствуют остаточные напряжения и деформации, что вызывает изменение эксплуатационных характеристик / /. По образному выражению Л.Эберт и П.Райт / ,с.65/ "Это – досадное упущение, обычно ведущее к неправильной интерпретации свойств и поведения композитов. Остаточные напряжения являются неотъемлемой характеристикой композита, а их отсутствие скорее исключение, чем правило". В общем случае под *остаточными напряжениями и деформациями* понимают сохраняющиеся во времени внутренние напряжения и деформации, которые присутствуют в теле, когда отсутствуют внешние силы / /. К основным причинам возникновения остаточных деформаций специалисты относят неоднородность деформаций в различных точках тела вследствие неравномерности температур, пластических деформаций, объемных изменений и т. п. / /.

Особенно подчеркивается, что остаточные напряжения столь же ответственны за

снижение эксплуатационных характеристик материалов и изделий, как и напряжения от внешних нагрузок. Основная опасность остаточных напряжений заключается в трудности прогнозирования их величины, направления действия и знака, особенно при коррозионном действии среды, циклических нагрузках и нагрузках, связанных с изменением влажности и температуры / /.

Непредсказуемость оценки роли остаточных напряжений в формировании свойств материалов и конструкций усиливается при применении сложноорганизованных материалов, к которым относится бетон. Это связано с тем, что остаточные напряжения и деформации могут возникать как на уровне материала, так и на уровне изделия или конструкции. Специалисты отмечают, что остаточные напряжения могут рассматриваться на микро- и макроуровнях / / . Микроструктурные остаточные напряжения формируются в период становления материала и зависят от объемных деформаций, связанных с физико-химическими и физико-механическими явлениями и процессами, которые протекают в период технологического становления материала. Макроструктурные остаточные напряжения возникают и формируются на уровне конструкции в период ее изготовления. Это предполагает, что формирование структуры КСМ и структуры конструкции происходит одновременно на всех уровнях структурных неоднородностях (подсистемах). Характер распределения и величина микроструктурных (*локальных*) и макроструктурных (*интегральных*) остаточных (*технологических*) деформаций и напряжений в значительной степени зависят от состава материала, вида конструкции и технологических условий ее получения. В данном случае можно говорить о *наследственной (генетической)* зависимости распределения остаточных деформаций и напряжений от предыстории получения готовой конструкции.

В работах / / в модель структуры КСМ включены технологические трещины и внутренние поверхности раздела. Присутствие внутренних границ раздела в виде берегов трещин и берегов внутренних поверхностей раздела создает предпосылки локализации внутренних деформаций и деформаций, связанных с внешними воздействиями. Участие внутренних поверхностей раздела в распределении нагрузок между отдельными структурными составляющими обосновывает, по нашему мнению, нарушению аддитивной связи между свойствами компонентов и свойствами материала.

Технологические трещины являются самыми нестабильными структурными элементами материала в силу специфической способности концентрировать напряжения у своего устья. Их присутствие в материале ведет к структурным изменениям под действием эксплуатационных нагрузок, особенно циклических и связанных с изменением влажности и температуры / / . Технологические трещины, по данным / / , могут присутствовать на всех масштабных уровнях

материала (подструктурах). Кинетика их развития в значительной степени предопределяет внутреннюю безопасность конструкции как системы и, тем самым, стабильность свойств в период эксплуатации. Количество, ориентирование и протяженность технологических трещин и внутренних поверхностей раздела определяются исходным составом материала, геометрическими характеристиками конструкции и технологическими условиями ее получения, что также позволяет заключить о *наследственном* влиянии технологии на поврежденность материала.

Рассмотренные выше элементы структуры (остаточные деформации, технологические трещины и внутренние поверхности раздела) закладываются в технологическом периоде создания конструкции на всех его этапах (см. раздел 7.2). Часть элементов структуры КСМ можно отнести к *консервативным* – практически не изменяющим свои свойства в течение всего периода эксплуатации. К таким элементам можно отнести: - крупные и мелкие химически инертные заполнители, их количественный и фракционный составы, распределение в материале; - армирующие элементы в случае отсутствия электрохимических процессов коррозии: - габаритные размеры конструкции; - количество и распределение по размерам пор и капилляров.

Более активными элементами структуры можно считать: - количество и качественный состав продуктов новообразований (для материалов на основе минеральных вяжущих); - количество и щелочность поровой жидкости; - состояние поверхностей раздела между отдельными компонентами или структурами. Подобные элементы структуры следует отнести к метастабильным структурным элементам.

К самым активным элементам структуры можно отнести: технологические трещины на всех масштабных уровнях материала; внутренние поверхности раздела между отдельными компонентами и структурами; локальные и интегральные остаточные (технологические, наследственные) деформации и напряжения. Их активность обусловлена созданием изначальных предпосылок изменения своих параметров под действием внешних нагрузок (например, развитие технологических трещин в трещины эксплуатации). Кроме того, присутствие таких элементов как внутренние поверхности раздела и остаточные деформации, закладывают основы совместной работы всех составляющих материала путем перераспределения между ними внешних нагрузок.

Таким образом, наличие в структуре материала метастабильных и активных структурных элементов, способных изменять свои параметры в процессе эксплуатации, дают основания представить конструкцию как динамичную самоорганизующуюся систему. В силу того, что основные структурные особенности закладываются в технологический период создания конструкций, то он стано-

вится одним из важных этапов, определяющих условия стабильной эксплуатации конструкции.

Проведенный анализ позволяет представить конструкцию как открытую динамичную самоорганизующуюся систему. Такое представление позволяет, по нашему мнению, более полно реализовать совместные усилия конструкторов и технологов, направленные на дальнейшее раскрытие потенциальных возможностей реализации свойств материала в конструктивных формах. Кроме того, использование возможностей структурной реорганизации (самоорганизации) через трансформацию активных структурных элементов, позволит проявиться эффектам адаптации, что обеспечит безопасную работу конструкции в различных условиях эксплуатации.

"...мы а priori познаем в вещах лишь то, что вложено в них нами самими".
Кант И. Критика чистого разума,
т.3. – М.: Мысль, 1964. – 799 с.

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

8.1. Декомпозиция конструкций как сложных систем

Обоснованием представления строительной конструкции как системы обосновывается на следующем: - строительная конструкция является целостной; - она состоит из определенных подсистем, находящихся в определенных отношениях и связях друг с другом; - строительная конструкция строго ориентирована для выполнения заложенных в нее целевых функций; - свойства конструкции не сводятся к свойствам ее составляющих.

При анализе строительной конструкции как открытой динамичной самоорганизующейся системы стоит задача ее моделирования. Выбор модели объекта зависит от цели анализа. В свою очередь, цели анализа в значительной степени определяются субъективными и объективными факторами. Из этого следует, что моделей выделенного объекта в виде некоторой целостности (системы) может быть несколько. При этом речь идет не о построении приоритетного ряда моделей, а о принятии различных моделей, каждая из которых должна адекватно отражать одну из характерных особенностей выделенного объекта.

В качестве объекта анализа примем железобетонную строительную конструкцию в виде изгибаемого элемента с характерными геометрическими размерами.

Основное функциональное назначение выделенного изгибаемого элемента заключается в его способности воспринимать внешние воздействия в требуемый период времени без разрушения. В данном случае под внешними воздействиями понимается комплекс нормируемых силовых (стационарных или динамичных) нагрузок и нагрузок, связанных с ее эксплуатацией в условиях температурных, влажностных и химических воздействий.

Для обеспечения выполнения основных функций конструкций как системы в нормируемый период эксплуатации необходимо не только, чтобы каждая подсистема обладала набором заданных свойств, но и трансформировала эти свойства в свойства конструкции путем внутренних взаимодействий. Под внутренними взаимодействиями понимаются взаимодействия между

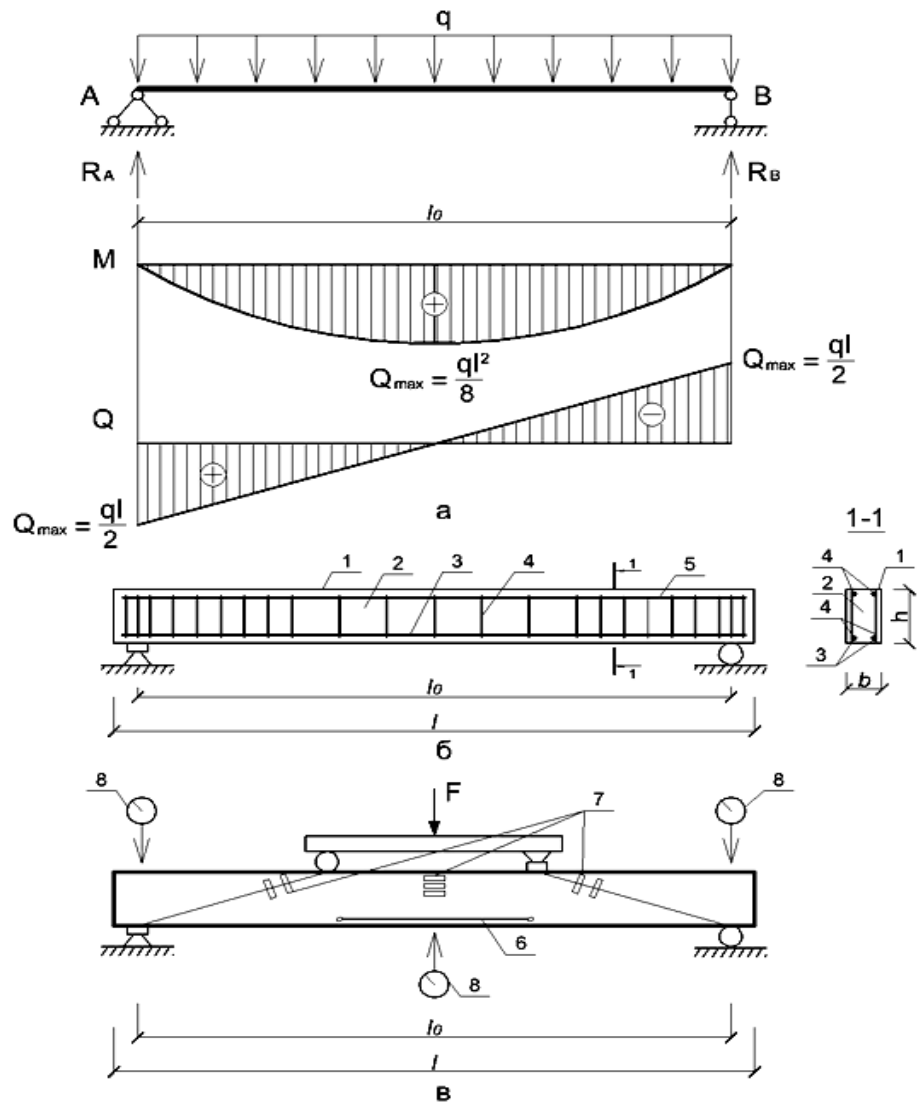


Рис.8.1. Расчетная модель конструкции.

а – расчетная схема; **б** – армирование модели конструкции; **в** – схема испытания конструкции.

l – крайнее сжатое волокно бетона; 2 – бетон железобетонной балки; 3 – продольная растянутая арматура; 4 – поперечная арматура; 5 – продольная сжатая арматура; 6 – тензометр сопротивления на арматуре; 7 – тензометры сопротивления на бетоне; 8 – индикаторы часового типа.

отдельными структурными элементами каждой подсистемы и между самими подсистемами.

Для выделения отдельных структурных элементов подсистем и самих подсистем необходимо разработать структуру конструкции. При описании структуры такой сложной системы как строительная конструкция, необходимо провести ее декомпозицию. Декомпозиция предполагает поэтапное выделение составляющих конструкции подсистем, декомпозицию подсистем с определением существенных для данного уровня структурных элементов. Это позволит разработать модели структуры отдельных подсистем и модели самой конструкции.

Нормируемые силовые нагрузки вызывают распределение по сечению конструкции сжимающих и растягивающих напряжений / /. При этом предполагается, что материал является сплошным и отвечает заданным требованиям

по прочности и деформациям. Модель принятого изгибаемого элемента должна учитывать распределение деформаций по сечению и может быть представлена следующей расчетной схемой, рис.8.1.а.

Принятые модели изгибаемых элементов адекватно описывают работу реальных конструкций в рамках феноменологического подхода.

Под внешними воздействиями, как отмечалось выше, понимаются эксплуатационные нагрузки, связанные с изменением температуры, влажности и с физико-химическими процессами коррозии. Изменение температуры может привести к нарушению сцепления арматуры с бетоном (даже при практически одинаковых коэффициентах температурных деформаций, на величину сцепления может оказать влияние скорость изменения температуры). Это позволяет выделить в качестве подсистемы границу раздела бетона с арматурой, рис.8.2.а.

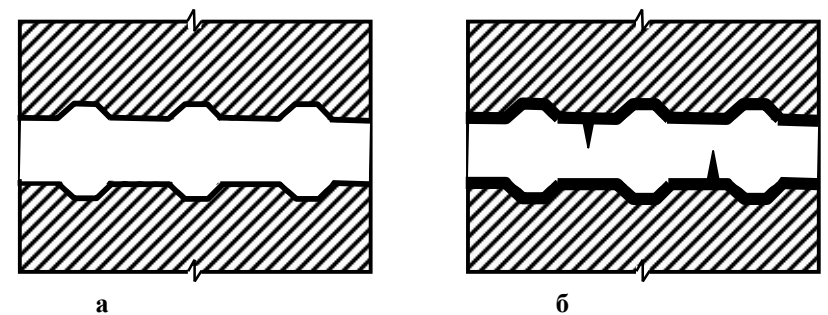


Рис.8.2.

а – структурные подэлементы конструкции (арматура и зона контакта арматуры и бетона); **б** – коррозия арматуры.

Выделение такой подсистемы оправдано также тем, что при возможных физико-химических воздействиях, могут развиваться электрохимические процессы коррозии арматуры, рис.8.2.б.

Коррозия арматуры может привести к нарушению величины сцепления, развитию давления на материал за счет увеличения в объеме продуктов коррозии, уменьшение рабочего сечения арматуры за счет коррозии по площади или за счет язвенной коррозии / / . Каждый по отдельности из этих процессов, а также их совместное действие, могут вызвать нарушение совместности работы бетона и арматуры, что приведет к изменению несущей способности конструкции. В связи с этим выделение данной подсистемы представляется необходимым шагом декомпозиции конструкции как системы, поскольку от его стабильности во многом зависит безопасное функционирование конструкции.

Несущая способность конструкции зависит от механических свойств и деформативных характеристик бетонов. Кроме того, эксплуатационная надежность конструкции определяется способностью бетонов претерпевать влажностные и температурные деформации без потери основных нормируемых свойств и сохранять защитные свойства по отношению к арматуре на весь период работы. Таким образом, бетон, являясь одной из основных составляющих железобетонных конструкций, можно представить в виде подсистемы.

В свою очередь, бетон является полиструктурным материалом, что дает основание представить его в виде сложноорганизованной подсистемы. Если рассматриваются бетонные изделия и конструкции как системы, то бетон можно представить в виде подсистемы, оформленной в определенные геометрические формы.

В специальной литературе / / рассматриваются различные модели структуры бетонов на плотных и пористых заполнителях с применением вяжущих различной природы. Базовыми моделями являются модели структурных ячеек бетонов, которые включают в себя заполнители, окруженные растворной частью (матричным материалом). Модели могут быть плоскими и объемными, с одним заполнителем или с группой заполнителей. Следует отметить, что аналогичные модели структурных ячеек приняты при анализе свойств полимерных композитов с различными способами армирования / / , композитов с металлической / / и керамической / / матрицами.

Использование моделей структурных ячеек позволило исследователям проанализировать механизм взаимодействия твердеющего матричного материала с заполнителями / / , механизмы морозного разрушения бетонов / / и распределения в них температурных деформаций / / , механизмы формирования прочности и деформативных характеристик бетонов / / и других композиционных материалов / / .

Применение моделей структурных ячеек бетоном дает возможность проанализировать влияние способов укладки, количества и фракционного состава заполнителей с различными свойствами на свойства бетоном. При этом учитывается изменение свойств матричного материала / / .

Различные модели структурных ячеек позволяют на качественном уровне с получением количественных зависимостей описать процессы тепло- и массопереноса в бетонах на плотных и пористых заполнителях и в ячеистых бетонах / / .

Обоснованием выделение бетонов в качестве подсистемы при представлении конструкций как систем является и тот факт, что выделенная подсистема сама может выступать в виде самостоятельной системы. Примером могут служить бетонные конструкции (например, фундаментные блоки, тампонажные и инъекционные материалы, мелкоштучные дорожные и тротуарные плитки и т.п.).

В качестве самостоятельной системы может выступать подсистема, представленная вяжущими (микроструктура КСМ) / / . Выделение вяжущих в качестве подсистемы конструкций как систем обосновывается следующим: - вид и природа вяжущих определяют область эксплуатации конструкций; - физико-технические характеристики материала конструкций зависят от количества вяжущих; - количественные соотношения вяжущих и других составляющих КСМ определяют технологические свойства смесей и технологические условия получения и переработки материалов в изделия; - вид и количество вяжущих определяют поведение материалов конструкций и, тем самым, самих конструкций при их эксплуатации в условиях воздействия переменных влажности, температуры и химических агентов.

Вещественный состав вяжущих позволяет решать не только технические задачи получения КСМ с заданными свойствами, но и решения социально-экономических задач, связанных со снижением материалоемкости строительства и охраной окружающей среды.

Проведенный анализ по декомпозиции строительной конструкции как системы позволил выделить следующие подсистемы:

- подсистему в виде строительной конструкции, в которой материал представлен в виде непрерывной среды, в которой определенным образом расположены армирующие элементы;

- подсистему, представленную бетонами различных составов на плотных и пористых заполнителях, которые сами являются сложноорганизованными и способными выполнять комплекс заложенных в них функций;

- подсистему в виде вяжущих различных вида и способов схватывания и твердения, которые, являясь сложно структурированными материалами, в значи-

тельной степени определяют свойства материалов конструкций и самих конструкций.

Проведенный анализ по декомпозиции строительной конструкции как системы позволил в первом приближении представить ее структуры, обеспечивающие выполнение, как целевого назначения всей системы, так и целевых функций отдельных подсистем. Авторы осознанно не приводят в этом разделе модель интегральной структуры конструкции как системы. Это связано, прежде всего, с сосуществующими в настоящее время феноменологическим и структурными подходами при оценке свойств и описании структуры сложноорганизованных объектов. Кроме того, проявление когнитивных свойств, как на уровне отдельных подсистем, так и на уровне конструкции, не дают возможность через интегральную структуру оценить свойства конструкции. Поэтому авторы пошли по пути описания отдельных структур, характерных для выделенных моделей конструкции.

Выделенные модели конструкции и отдельных подсистем будут, по мере проведения анализа, уточняться с целью выделения конкретных структурных параметров, ответственных за проявления тех или иных свойств. В этом состоит, по мнению авторов, один из парадоксов структурного (системного) подхода – оценка структурных особенностей сложноорганизованных материалов методами, принятыми для структурно неоформленных объектов.

8.2. Моделирование структуры конструкции как системы

Сосуществование различных по виду, качественному, количественному составу и назначению подсистем обеспечивают целостность и предназначение конструкции как системы. В то же время можно предположить, что каждая выделенная подсистема может содержать в своей структуре определенный набор консервативных, метастабильных и активных элементов. Поэтому возникает необходимость более подробно остановиться на роли этих элементов в индивидуальных подсистемах и в системе в целом.

Как отмечалось выше, к консервативным элементам можно отнести элементы, которые практически не изменяют свои параметры в процессе эксплуатации конструкции. Следует отметить, что подобная "пассивность" консервативных элементов может наблюдаться только после завершения первого этапа существования открытых систем и на протяжении всего этапа "зрелости" системы.

На этапе становления в развивающейся системе нет элементов, которые не оказывали бы влияние на организацию структуры, как отдельных подсистем, так и системы в целом. В качестве примера можно рассмотреть влияние геомет-

рических характеристик конструкции на формирование ее структуры. Под геометрическими характеристиками конструкции понимаются ее габаритные размеры. В работах [] показано, что распределение объемных деформаций твердеющего материала не зависит от природы вяжущего, а определяется геометрическими особенностями образца, изделия, конструктивного элемента и самой конструкции. В зависимости от геометрии конструкции возникают и развиваются градиенты объемных деформаций по величине и направлению. В свою очередь, градиенты собственных деформаций вызывают градиенты плотности вещества на всех уровнях структурных неоднородностей, включая уровень вяжущего. Спонтанное локальное изменение плотности может интенсифицировать или замедлять физико-химические процессы твердения (например, реакции гидратации для минеральных вяжущих). Это ведет к углублению градиентов объемных изменений, которые проявляются на внешних поверхностях конструкции. Происходит очередной этап перераспределения объемных деформаций, которые "передаются" на уровень вяжущего. При этом может происходить формоизменение внешних поверхностей конструкции, что ведет к дальнейшему развитию градиентов деформаций по величине и направлению [].

Развивающиеся градиенты деформаций перераспределяются на внешних и внутренних границах раздела, "замораживаются" и присутствуют в материале конструкции в виде начальных (остаточных, технологических) деформаций. В свою очередь, остаточные деформации оказывают влияние на последующую работу материала в конструкции. В работах [] показано, что в зависимости от способов иницирования начальной трещины (метод заложения при формовании образца или метод распила сформированного образца []) значения коэффициента интенсивности напряжений могут изменяться более чем в два раза.

Более подробный анализ влияния крупных и мелких заполнителей как консервативных элементов на организацию структуры бетонов будет рассмотрен ниже.

Таким образом можно заключить, что на стадии "создания" системы все элементы активно участвуют в ее структурном оформлении. После достижения требуемого набора свойств изменение параметров консервативных элементов практически не происходит. Однако это не означает, что они остаются пассивными в случаях внутренних и внешних источников изменения состояния системы. При не изменяющихся параметрах, консервативные элементы могут провоцировать перераспределение объемных деформаций между отдельными подсистемами и в самой системе. Например, распределение температурных и влажностных деформаций в затвердевшем материале зависит, как и при создании системы, от ее геометрических характеристик. Это ведет к развитию градиентов деформаций и напряжений, что может быть причиной нарушения целостности

материала. Сохранение параметров консервативных элементов при воздействии на систему внешних факторов не предполагает их пассивную роль в возможных структурных перестройках системы. Собственная стабильность консервативных элементов является, по нашему мнению, одним из управляющих факторов, позволяющих регулировать структурную стабильность отдельных подсистем и системы в целом в условиях воздействия на нее эксплуатационных нагрузок. В последующих разделах будут рассмотрены вопросы влияния консервативных элементов структуры системы на ее внутреннюю и внешнюю безопасность.

К метастабильным элементам структуры отнесены элементы, которые достаточно медленно изменяют свои параметры в период активной жизни конструкции как системы. В данном случае авторы сознательно используют такое нечеткое определение изменения параметров как "достаточно медленно". По нашему мнению, время изменения структурных параметров должно соотноситься со временем воздействий, вызывающих эти структурные преобразования. При отсутствии критических внешних воздействий материалы на основе минеральных вяжущих "живут" в согласованных темпоритмах []. Непрерывающиеся процессы гидратации и перекристаллизации вызывают изменения капиллярной пористости, что ведет к адекватным структурным перестройкам на всех уровнях структурных неоднородностей. Свойства материала изменяются пропорционально естественно протекающим структурным изменениям. В данном случае приведен пример медленно развивающихся процессов и явлений, которые ведут к соответствующим изменениям структурных параметров. В этом заключена сущность метастабильных состояний системы через кажущуюся стабильность структурных элементов в ограниченном временном интервале.

В большинстве случаев система воспринимает быстроразвивающиеся внешние воздействия (например, суточный перепад температур, увлажнение, динамические нагрузки и т.п.). Нарушаются темпоритмы, связанные со временем воздействия и со временем адекватной реакции на эти воздействия. Временное несовпадение воздействия и реакции на него связано с самой природой метастабильных элементов структуры. Углубление процессов гидратации реликтовых объемов зерен вяжущего растянуто во времени с пропорционально медленным набором механических характеристик. Участие процессов продолжающейся гидратации вяжущего, как источника восстановления потерянных по каким-то причинам свойств, в работе [] отнесено к проявлению адаптационных свойств материалов на основе минеральных вяжущих. Для проявления свойств адаптации необходимо, чтобы время, нужное для "самозалечивания" материала, превышало бы время структурных изменений, вызванных внешними воздействиями. Необходимо присутствие дополнительных элементов структуры, которые могут принять на себя внешние воздействия, гасить их энергию за счет измене-

ния своих параметров. Это должно привести к изменению структуры системы и, одновременно, служить пусковым механизмом для включения в работу метастабильных элементов структуры. Для этого в системе должны присутствовать структурные элементы, способные работать в одном темпоритме с воздействиями. Такие элементы структуры отнесены к активным.

В данном случае следует отметить, что кроме присутствия активных элементов структуры в системе определенным образом распределены локальные и интегральные остаточные деформации и напряжения. Остаточные деформации воспринимают и перераспределяют внешние и внутренние воздействия между отдельными подсистемами и в системе в целом. В зависимости от их начального распределения, остаточные деформации могут усиливать воздействия до критических значений или релаксировать (диссипатировать) их влияние. Роль остаточных деформаций и напряжений в обеспечении внутренней безопасности открытых систем требует отдельного исследования и изучения. Сами остаточные (начальные, технологические, наследственные) деформации не могут быть выделены в качестве элементов структуры. Они характеризуют энергетическое состояние отдельных подсистем и системы в целом. В данном разделе основное внимание уделено элементам структуры, что предполагает более полный анализ их влияния на поведение систем.

К активным элементам структуры отнесены технологические трещины и внутренние поверхности раздела.

Технологические трещины (ТТ) (наследственные, начальные, остаточные) – несплошности, у которых ширина между противоположными плоскостями намного меньше их длины и противоположные плоскости обязательно смыкаются, образуя устье трещины. ТТ характеризуются длиной, шириной раскрытия, площадью берегов, радиусом устья. Линия смыкания противоположных берегов является фронтом трещины. По нашему мнению существует несколько отличий ТТ от "обычных" трещин: противоположные берега ТТ, как правило, содержат различный вещественный состав; для каждого берега ТТ характерен свой собственный рельеф; рельеф ТТ может изменяться во времени за счет продолжающейся гидратации минералов цемента и за счет явлений диффузионного массопереноса; радиус устья ТТ может изменяться вдоль фронта и изменяться во времени за счет явлений диффузионного массопереноса. ТТ присутствуют на всех уровнях структурных неоднородностей. К рангу технологических подобные трещины отнесены в силу того, что они являются неотъемлемыми элементами структуры материала конструкции до приложения к ней эксплуатационных нагрузок.

Внутренние поверхности раздела (ВПП) – плоскости, образованные в материале, которые удалены друг от друга на расстояние, намного меньшее длины самих плоскостей.

Противоположные плоскости (берега) не смыкаются, что принципиально отличает ВПП от ТТ. Берега ВПП, как и берега ТТ характеризуются индивидуальным выходом на их поверхность минералов вяжущего и продуктов новообразований. Рельеф противоположных берегов, как правило, не совпадает и может изменяться во времени за счет непрекращающихся реакций гидратации и явлений диффузионного массопереноса. ВПП присутствуют на всех уровнях структурных неоднородностей материала конструкции до приложения к ней эксплуатационных нагрузок.

Совокупность ТТ и ВПП определяют поврежденность отдельных подсистем и всей системы технологическими дефектами. Несмотря на очевидность приведенного выражения, в нем содержится определенный парадокс. В силу того, что ТТ и ВПП являются объективно существующими элементами структуры и в силу того, что трещина, по определению, является базовым элементом процесса разрушения, то смысловая нагрузка терминов "поврежденность" и "дефектность" в данном контексте как будто связана с их негативным влиянием на свойства как отдельных подсистем, так и системы в целом. К сожалению, в специальной и технической литературе авторам не удалось обнаружить информацию, которая позволила бы отнести трещины, включая технологические, к элементам структуры, которые способствуют обеспечению внутренней безопасности системы. Несколько больше информации о ВПП, анализ которой показывает, что состояние ВПП, особенно на границе "матрица – включения", оказывает влияние на механические, деформационные характеристики и вязкость разрушения материалов []. При этом не оговаривается взаимообусловленность трещин и ВПП. Поэтому терминов, которые позволяют представить трещину не только в роли разрушителя, но и в роли своеобразного созидателя, нам обнаружить не удалось. Не являясь специалистами в области терминологии, авторы вынуждены использовать установившиеся термины "поврежденность", "дефекты" и другие подобные выражения, закладывая в них, по мере надобности, иной смысл. Сами эти термины необходимы авторам для количественной оценки суммарного количества ТТ и ВПП в отдельных структурных неоднородностях, в материале и в конструкции как в системе. В отсутствие адекватной смыслу терминологии заключатся один из парадоксов системного подхода.

Зарождение и развитие ТТ происходит одновременно с процессами превращения материала из исходного сырья в конечный продукт. Можно утверждать, что возникновение ТТ является необходимым актом становления композиционных материалов. Сам процесс возникновения и развития трещин в твер-

деющем материале несколько отличается от классических процессов, принятых в теории прочности [] и механике разрушения []. Анализ механизмов зарождения и развития ТТ на различных уровнях структурных неоднородностей (отдельных подсистемах), как и понимают авторы, будет рассмотрен в соответствующих разделах.

Перед авторами стоит задача предложить модель конструкции, как системы, основными системными элементами которой является совокупность ТТ и ВПП. При этом авторы исходят из априорной информации о наличии ТТ и ВПП в выделенных подсистемах (структурных неоднородностях).

Выделение ТТ и ВПП в качестве основополагающих элементов структуры базируется на следующем – ТТ и ВПП являются активными структурными элементами. Активность их проявляется в следующем: присутствие ТТ создает в материале неравномерное распределение напряжений, при котором напряжения релаксируются в районе берегов трещины с концентрацией у устья вдоль фронта трещин; возникающие объемные деформации, связанные с внутренними и внешними факторами, проявляются на берегах ТТ и ВПП, что ведет к частичной их диссипации и частично перераспределяются посредством поверхностей раздела между структурными составляющими на различных уровнях структурных неоднородностей; ТТ в первую очередь реагируют на внешние воздействия, что может привести к изменению их параметров за счет подрастания, увеличению, тем самым, площади поверхности берегов и, в итоге, к структурным изменениям как отдельных подсистем, так и всей системы.

В силу того, что ТТ и ВПП распределены в отдельных подсистемах определенным образом, то при подрастании ТТ не исключены ситуации, при которых они начнут выклиниваться на берега других ТТ или на берега ВПП. При этом ТТ "теряют" свои самые существенные отличительные признаки – устье и фронт трещины, превращаясь, тем самым, в качественно иные структурные элементы – ВПП. В этом, по нашему мнению, заключена созидательная роль ТТ. Превращаясь в новые для данной подсистемы структурные элементы, трещины тратят часть приобретенной внешней энергии на свой рост. Замыкаясь на берега трещин и ВПП, ТТ трансформируются в поверхности раздела, вызывая изменение структуры отдельных подсистем и системы в целом.

В готовом материале ТТ и ВПП присутствуют сразу на всех уровнях структурных неоднородностей. В силу того, что они являются результатом организации структуры, то в готовом материале они представлены в виде сформировавшихся структурных элементов на каждом уровне структурных неоднородностей.

Особую роль выполняют ВПП – они своими берегами делят материал на отдельные фрагменты (блоки). При этом в каждом фрагменте существуют свои

ТТ и ВПР. Взаимодействие блоков между собой на каждом уровне структурных неоднородностей обеспечивает проявление средних свойств, принятых в рамках исходной модели в виде сплошной (неструктурируемой) среды.

Комбинации ТТ и ВПР в отдельных подсистемах и в системе в целом, которые закладываются в технологический период создания системы, обеспечивают проявление требуемых свойств системы и должны обеспечить безопасность открытой системы в течение всего периода выполнения заложенных в нее функций. Это позволило нам предложить и разработать модель конструкции как открытой системы, основными составляющими которой являются активные элементы структуры (рис.8.3).

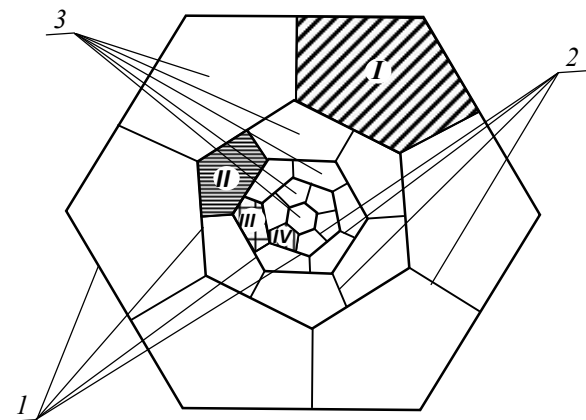


Рис.8.3. Модель структуры конструкции как открытой динамической системы.

1 – технологические трещины в различных подсистемах и в системе в целом; 2 – внутренние поверхности раздела на уровне подсистем и системы; 3 – структурные блоки в отдельных подсистемах и в самой системе; I – система; II – подсистема, представленная бетоном; III – подсистема, представленная цементным камнем; IV – подсистема, представленная продуктами новообразования.

Предложенная модель структуры конструкции как сложной открытой динамической системы предназначена для анализа возможных структурных реорганизаций при действии на систему внутренних и внешних факторов. Авторам представляется оправданным выделить из системы только активные элементы, которые способны в первую очередь реагировать на практически любое изменение условий работы системы. В силу того, что активные элементы работают в одном темпоритме со временем воздействий, то не исключены ситуации, при которых через изменение собственных параметров энергия воздействий будет гаситься, локализовываться и диссипатировать. Это создаст запас времени для

включения в работу метастабильных и консервативных элементов, которые будут способствовать внутренней безопасности системы. Произойдет внутренняя перестройка отдельных подсистем и всей системы, пусковым механизмом которой является изменение структурной организации активных элементов. Подобная структурная перестройка связана с процессами самоорганизации, благодаря которым система адаптируется к новым условиям при условии сохранения приданных ей функций. Таким образом, предложенная модель позволяет проанализировать механизмы первичной спонтанной перестройки открытой системы и определить управляющие факторы, обеспечивающие безопасную работу конструкции, как системы, в нестабильных условиях эксплуатации.

8.3. Синергетический подход при анализе конструкции как открытой системы

Внутренняя и внешняя безопасности открытых систем в процессе выполнения их основных функций реализуются за счет проявления явлений самоорганизации. Под самоорганизацией понимают самопроизвольный (без вмешательства извне) процесс структурной перестройки с целью сохранения функциональных свойств системы при изменении внешних условий []. Самоорганизация (самоприспособление) относится к рангу общесистемных закономерностей, поскольку она присуща системам различного вида и класса (технических, социальных, биологических и т.п.). Кроме того самоорганизацию можно представить как самопроизвольное возникновение и самоподдержание упорядоченных временных и пространственных структур в открытых системах различной природы []. Направление науки, которое изучает процессы и явления, происходящие в открытых нелинейных системах, называют синергетикой [].

Основы синергетики (от греч. synergetikos – сотрудничество, согласованное действие, соучастие), как самостоятельного направления научных исследований, были заложены в 1969 г. немецким физиком Г.Хакеном. он употребил термин "синергетика" при описании когерентной световой волны лазерного излучения. Смысл, заложенный сначала в термин, а после – в научное направление "синергетика", позволил несколько по иному интерпретировать эффекты образования устойчивых структур при подводе к системе внешней энергии (например, ячейки Бенара, реакции Б.П.Белоусова и А.М.Жаботинского и др.) []. Было обращено внимание на кооперативное действие многих элементов, которые, самоорганизуясь, образуют устойчивые пространственные и временные структуры. В связи с этим понятие "самоорганизация" является ключевым при раскрытии сущности синергетики как науки о самопроизвольном возникновении и само-

поддержании упорядоченных структур в открытых системах различной природы [].

Спонтанное возникновение устойчивых структур в неравновесных термодинамических системах отмечал И.Р.Пригожин []. При разработке основ неравновесной термодинамики указывалось, что возможны ситуации, при которых энтропия системы убывает []. Это свидетельствует о возникновении в открытой термодинамической системе устойчивых упорядоченных структур []. Такие структуры были названы диссипативными структурами. Диссипация (от лат. dissipatio - рассеяние) – это свойство системы обмениваться со своим окружением энергией и / или веществом. В силу способности диссипативных структур самопроизвольно отдавать или принимать энергию или / и вещество, они являются достаточно чувствительными к изменениям параметров окружающей среды. Подобные изменения могут произойти в результате флуктуаций (от лат. fluctuatio – колебания) – случайных отклонений наблюдаемых физических величин от их средних значений. При синергетическом подходе флуктуации играют тройственную роль: если даже крупная флуктуация не превысила некоторого порогового значения, она может "погаситься" соседними структурными составляющими и не вызвать в системе структурных изменений; флуктуации могут выступать в роли зародышей, потенциально готовых к разрастанию, что ведет к структурной перестройке системы и, следовательно, изменению ее свойств; флуктуация может являться причиной структурной трансформации системы (феномен самоорганизованной критичности).

Роль флуктуации возрастает по мере достижения системой высокой степени неравновесности и нестабильности. По мнению И.Р.Пригожина зависимость открытой нелинейной системы от флуктуаций отдельных параметров среды или в самой системе подводит ее к точке бифуркации (от лат. bifurcus – раздвоение). Можно предположить, что отдельные элементы структуры, сами входящие в систему структуры, спонтанным образом в точке бифуркации способны изменить свои параметры. Происходит необратимая структурная переорганизация, в результате которой система приобретает новые свойства. Кроме того, структурное переоформление намечает новые пути эволюции системы. В силу того, что качественные и количественные структурные преобразования являются следствием случайно развиваемых флуктуаций, то предполагается, что после прохождения точки бифуркации последующее поведение системы и, следовательно, проявление ее свойств, предсказать практически невозможно. Специалисты отмечают, что после точки бифуркации происходит ветвление фазовых траекторий системы. Под фазовой траекторией понимается движение точки состояния системы в фазовом пространстве вдоль линии. Совокупность фазовых траекторий образует фазовый портрет системы. Как правило, фазовый портрет систе-

мы формируется путем схождения фазовых траекторий к аттрактору (от лат. atraho – притягиваю к себе). Аттрактор можно представить как некоторое компактное асимптотическое устойчивое множество в фазовом пространстве рассматриваемой динамической системы. Под аттрактором также понимают состояние системы, к которому она стремится. Поэтому уместно говорить о бифуркации как о моменте выбора между различными аттракторами или развилками дорог эволюции. Направление дальнейшего развития системы начинает определяться только после попадания в воронку, конус или бассейн притяжения – некоторую окрестность аттрактора, к которой притягиваются фазовые траектории. Можно предположить, что вид аттрактора предопределяет способность системы сохранять свои основные функции через структурную перестройку при прохождении через точку бифуркации. При этом структурная переорганизация должна находиться в пределах, которые не позволяют развиваться в системе катастрофическим изменениям свойств. Представив аттрактор как своеобразный фактор управления поведением системы, можно, по нашему мнению, изначально заложить в систему потенциальные возможности возникновения данного вида аттрактора, при достижении системой критических состояний. Это позволяет предложить два принципиально отличных по механизмам проявления процессов самоорганизации сложных открытых систем: явления самоорганизации в период создания системы и проявление спонтанной структурной перестройки в период выполнения открытой системой заложенных в нее функций. Принципиальное отличие явлений самоорганизаций, протекающих в период создания системы и в период ее активной жизни, заключается, по нашему мнению, в том, что при образовании системы самозарождается определенный набор структурных элементов, а при службе готовой системы происходит своеобразная трансформация элементов структуры, приобретенных в предыдущий период. Такие представления вписываются в общую схему синергетического подхода при анализе структурных преобразований в течение всей "жизни" открытой системы.

Приведенная информация позволяет в общем виде представить модели процессов и явлений, сопровождающих структурные преобразования от момента рождения системы, выполнения заложенных в нее функций до ее деградации и гибели. Можно предположить, что для каждого вида открытых самоорганизующихся систем существует свой набор элементов структуры, которые в наибольшей степени определяют ее свойства и способность сохранять требуемый уровень свойств при неблагоприятных внешних воздействиях. Поэтому важной задачей является выявление таких структурных элементов, анализ механизмов их возникновения в системе и механизмов изменения их параметров, направленных на сохранение системой приобретенных свойств. При этом следует учитывать, что для каждой реальной системы существует свой набор элементов структуры,

трансформация которых должна быть направлена на обеспечение внутренней безопасности системы.

При моделировании структуры конструкции как открытой системы учитывалась реакция отдельных элементов структуры на внешние воздействия (раздел 2.2). Следует подчеркнуть, что предложенная классификация справедлива на этапе воздействия на сформировавшуюся конструкцию эксплуатационных нагрузок. На этапе становления конструкции как системы большинство выделенных элементов в системе не существуют. Они самозарождаются в процессе приготовления материала, оформления его в конструктивные элементы и зависят от физико-химических и физико-механических явлений, связанных с его твердением и структурообразованием. Это дает основание еще раз подчеркнуть основополагающее влияние рецептурно-технологических факторов на последующую безопасную эксплуатацию конструкций.

В силу того, что в работе сознательно и настойчиво подчеркивается важная роль активных структурных элементов, то основные акценты расставлены на их спонтанное возникновение и развитие на различных уровнях структурных неоднородностей в бетоне как полиструктурном материале. Из этого не следует, что авторы недооценивают роль других совокупных структурных составляющих на формирование свойств и обеспечение безотказной работы материала в конструкции. Их влияние чрезвычайно велико и становится доминирующим в процессах восстановления свойств материала после неблагоприятных внешних воздействий. Возможность включения их в созидательные процессы может быть реализована только после того, и авторы на этом настаивают, как активные элементы воспримут на себя весь комплекс внешних воздействий. Реализуется своеобразная накачка внешней энергии в объем системы. Через внутренние поверхности раздела энергия перераспределяется между различными структурными неоднородностями, трещины выходят из равновесного состояния и образуют новые поверхности раздела. Происходит адекватная внешним воздействиям структурная перестройка, на которую расходуется часть энергии. Успешной структурную перестройку следует считать в том случае, если произошла диссипация энергии, процессы трансформации активных элементов стабилизировались, и свойства системы не превысили критических значений. После этого начинают включаться в работу метастабильные элементы, что ведет к очередному этапу структурной реорганизации и, при благоприятных условиях, к восстановлению свойств системы. Следует отметить, что описанная поэтапность включения в работу активных и метастабильных элементов структуры – только модель процесса реакции структуры материала на внешние воздействия. В реальности, при непрерывно действующих внешних раздражителях активные элементы находятся в перманентном состоянии структурных изменений, провоци-

руя, тем самым, постоянное включение в работу метастабильных элементов. Поэтому интегральная структура открытой самоорганизующейся системы является сиюминутным фактором, своеобразной "фотографией", фиксирующей структуру в данный момент []. Способность системы к постоянному изменению структур на различных уровнях неоднородностей является, с позиций синергетического подхода, достаточно веским фактором проявления способности самосохранения (адаптации) []. Такая способность в значительной степени определяется "набором" всех элементов структуры, которые система приобрела в процессе своего становления.

Общие принципы возникновения различных по виду элементов структуры представлены на примере изготовления железобетонной конструкции в виде изгибаемого элемента. Весь этап становления конструкции включает в себя приготовление рационально подобранной бетонной смеси, укладка ее в подготовленные формы, уплотнение и твердение (ускоренное или нормальное). Анализ наиболее характерных механизмов организации структуры начинается с момента твердения бетона в изделии. При этом принимается, что бетонная смесь однородная, в ней практически отсутствует седиментация и сформирован непосредственный контакт матричного материала с поверхностью заполнителей и арматуры (цементное тесто – с поверхностью мелкого и крупного заполнителя и арматуры, растворная часть – с поверхностью крупного заполнителя и арматуры).

В разделе 8.1 предложено в бетонной конструкции как системе выделять следующие подсистемы: подсистему на уровне конструктивного элемента, в котором определенным образом распределена основная и вспомогательная арматура; подсистему, представленную бетоном (макроструктура); подсистему на уровне микроструктуры, представленную цементным тестом и цементным камнем. Из анализа исключены механизмы формирования структуры на уровне взаимодействия бетонной смеси и бетона с армирующими элементами.

Начальная структура конструкции формируется после уплотнения бетонной смеси. Основными структурными признаками можно считать геометрические характеристики изделия и формирование внутренних границ раздела между матричным материалом и поверхностью мелких и крупных заполнителей. Примем, что потери воды из бетонной смеси не происходят и отсутствует изменение температуры. Это предполагает отсутствие физической составляющей объемных изменений бетонной смеси и стабильность внешних и внутренних границ раздела. Началом организации структуры следует считать первичное распределение частиц минерального вяжущего по структурным блокам-кластерам []. В микроструктуре спонтанно возникают новые структурные образования. В [] предложены различные схемы образования кластерных структур в зависимости от индивидуального для каждого зерна минералогического состава.

При этом не исключены ситуации взаимодействия мономинеральных зерен между собой с образованием практически мономинеральных кластеров, а также пространственное ориентирование полиминеральных зерен с образованием межчастичных мономинеральных контактов. Это создает условия для формирования индивидуальных по количественному и качественному составу структурных агрегатов. Практически одновременно с распределением частиц по структурным блокам происходит физико-химическое взаимодействие минералов цемента с водой, что ведет к появлению новых для микроструктуры элементов – продуктов новообразования. Часть появившихся ионов группируется на поверхности зерен и, при достижении критической концентрации, образуют зародыши, лимитируя, тем самым, диффузию молекул воды вглубь зерен вяжущего []. Часть ионов переходит в объем жидкой фазы, что создает предпосылки для образования гелевой составляющей цементного камня []. Механизмы образования гелевидной составляющей (в другой терминологии – взвесь субмикроструктур) раскрыты недостаточно полно. Анализ организации микроструктуры позволяет заключить, что структурные элементы, появившиеся в результате физико-химических процессов гидратации, образуют новую для системы структурную неоднородность. Можно предположить, что взаимодействие ионов между собой, которое происходит в результате термо-флуктуаций, ведет к образованию кластеров на нанометрическом уровне – нанокластеров []. Каждый нанокластер имеет индивидуальный набор ионов, что разнообразит структурное оформление новой структурной неоднородности. Если предположить, что с увеличением степени гидратации концентрация нанокластеров в межчастичном пространстве возрастает, то в результате нанокластерных взаимодействий формируется структура на наноуровне – наноструктура. Наноструктура представлена нанокластерами различных размеров и форм, количественным и качественным набором ионов, межкластерными поверхностями раздела, моно- и полиадсорбированными на межкластерных поверхностях молекул воды. Наноструктура должна вызывать проявление повышенных прочностных свойств. Это связано с большой площадью поверхности раздела между нанокластерами и проявлением аномальных прочностных свойств []. Специалисты отмечают, что даже в случае "рыхлой" структуры самих кластеров, что ведет к снижению плотности, за счет проявления прочностных свойств прочность нанокластеров возрастает. Стабильность наноструктуры обеспечивается также адсорбированными молекулами воды.

Таким образом, в результате физико-механических процессов межчастичных взаимодействий (на уровне исходных частиц вяжущего и на уровне ионов) в микроструктуре спонтанно формируются структурные блоки с индивидуальным для каждого блока количеством и видом частиц. Происходит перераспределение частиц вяжущего в зависимости от их минералогического состава и размера, что

ведет к возникновению очагов (центров) дальнейшего структурного оформления цементных композиций. Распределение частиц по структурным агрегатам провоцирует возникновение в данной подсистеме принципиально новых элементов структуры – межагрегатных (межкластерных, межблочных) поверхностей раздела. Одновременно с переходом частиц в более равновесное механическое состояние происходит их взаимодействие с водой растворения. Физико-химические реакции вызывают появление в системе новых элементов – продуктов гидратации, формируя, тем самым, структурную неоднородность на уровне новообразований. Концентрация и распределение частиц новой фазы по виду зависят от размещения исходных зерен вяжущего в кластерах. Происходит спонтанная локализация твердой фазы (включая продукты новообразований) в отдельных объемах, что ведет к кластер-кластерным взаимодействиям на различных уровнях неоднородностей. Это расширяет структурное разнообразие микроструктуры, при котором в каждом выделенном объеме (например, на уровне структурного агрегата) присутствует свой, практически неповторимый набор исходных частиц вяжущего и продуктов новообразований. При этом прослеживается общая тенденция при протекании физико-химических явлений гидратообразования и физико-механических процессов организации структуры – образование дискретных структурных блоков и поверхностей раздела между ними.

Известно [], что физико-химические процессы гидратации сопровождаются общим уменьшением объема системы "цемент + вода" при увеличении объема твердой фазы. Индивидуальные объемные изменения отдельного зерна цемента трансформируются в индивидуальные объемные изменения кластеров, и путем межкластерных взаимодействий формируют объемные интегральные деформации всей системы. Интегральные объемные деформации проявляются на внешних границах раздела конструкции и на внутренних границах раздела. В работах [] рассмотрен механизм распределения объемных деформаций в зависимости от геометрических особенностей внешних и внутренних границ раздела. Показано, что в зависимости от геометрии образца или изделия возникают и развиваются градиенты деформаций по величине и направлению. Это может быть причиной формоизменения поверхности раздела, возникновения деформаций сдвига в зонах максимального изменения формы, что может быть причиной нарушения целостности материала.

Распределение интегральных деформаций на внутренних поверхностях раздела зависит от адгезионно-когезионных сил связи твердеющего матричного материала с поверхностью заполнителей, количества заполнителей и его гранулометрического состава []. Если принять, что форма и микрорельеф каждого зерна мелкого и крупного заполнителей индивидуальны, то можно предположить, что в каждой структурной ячейке бетона будет реализована своя схема

распределения объемных деформаций внутри ячейки. При этом выделяются локальные деформации, распределение которых зависит от микрорельефа поверхности заполнителей, и интегральные деформации, которые зависят от геометрических особенностей каждой структурной ячейки. Таким образом, бетон, как подсистему конструкции, можно представить как содружество структурных ячеек с индивидуальным для каждой ячейки распределением локальных и интегральных деформаций и внутренних поверхностей раздела, под которыми понимаются границы раздела с заполнителями, берега несплошностей в виде трещин и поверхностей раздела. Более подробно механизм организации макроструктуры бетона будет рассмотрен в соответствующем разделе.

Микроструктура, инициируя объемные деформации, воспринимает градиенты деформаций, которые возникают в макроструктуре. Неравномерное распределение локальных и интегральных деформаций ведет к локальному изменению плотности на уровне микроструктуры. Это, в свою очередь, вызывает изменение концентрации твердой составляющей, возможное деформирование кластеров и, таким образом, межкластерных поверхностей раздела. Флуктуация плотности и концентрации продуктов новообразований провоцирует процессы диффузионного массопереноса внутри системы, что может привести к появлению новых структурных образований. В силу того, что эти процессы протекают на фоне продолжающихся физико-химических явлений гидратации, в системе постоянно развиваются объемные деформации. Все последующие деформации проявляются на внешних и внутренних границах раздела с измененными параметрами и на новых поверхностях раздела в виде межкластерных поверхностей, берегах возникших несплошностей на различных уровнях структурных неоднородностей. Происходит очередное перераспределение собственных объемных изменений, что сопровождается дальнейшими процессами развития градиентов деформаций по величине и направлению. Если в начале наблюдалось поэтапное развитие процессов структурирования через межчастичные и межфазные взаимодействия, то в последующем спонтанные явления образования структур на различных уровнях неоднородностей происходят параллельно и в самосогласованном режиме. Самосогласованность режимов, или единый темпоритм [], обусловлен взаимообусловленностью физико-механических и физико-химических процессов и явлений с пропорциональным им развитием деформаций, распределением деформаций в зависимости от геометрии макроуровня, возникновением градиентов деформаций в макро- и микроструктурах, провоцированием флуктуаций плотности в макроструктуре и концентрацией продуктов новой фазы в микроструктуре, очередным инициированием (замедлением) гидратации с последующим развитием объемных деформаций. Можно заключить, что в системе с определенным периодом на различных структурных уровнях протекают вол-

новые процессы перераспределения собственных деформаций. При этом происходит непрерывное образование новых элементов структуры в виде несплошностей и изменение параметров уже существующих. Это ведет к качественно иному распределению собственных деформаций, что оказывает влияние на адекватную переорганизацию структуры.

Образовавшиеся несплошности в виде межкластерных поверхностей раздела на различных уровнях неоднородностей, берегов трещин и внутренних поверхностей раздела могут, при определенных ситуациях, вырождаться в поры и капилляры и оставаться в материале в виде трещин и внутренних поверхностей раздела. Система превращается в диссипативную, в которой часть энергии деформаций рассеивается на внутренних поверхностях, а часть расходуется на образование новых элементов структуры.

По мере исчерпания ресурсов, необходимых для протекания физико-химических процессов гидратации в прежнем объеме, деформационные "волны" затухают. Происходит фиксация структур на различных уровнях неоднородностей и общее структурное оформление конструкции как системы. В этот период в общей структуре можно выделить консервативные, метастабильные и активные структурные элементы, которые должны предопределять безопасность конструкции как открытой системы в процессе ее активной жизни.

Цель синергетического подхода при анализе процессов организации структуры конструкции, как открытой системы, заключается в выработке управляющих факторов, с учетом явлений самоорганизации, для получения прогнозируемого набора различных по виду и назначению структурных элементов. Накопленный опыт получения строительных конструкций различного назначения индустриальным методом и в построечных условиях позволил разработать действенные мероприятия по обеспечению заданных требований к конструкции при минимизации материальных, энергетических и трудовых ресурсов. К ним можно отнести использование структурообразующих и пластифицирующих химических добавок, применение наполнителей, всевозможные методы активации отдельных компонентов, всей системы и процессов гидратации и т.п. []. Действенность существующих методов не предполагает их исчерпаемость. Представление конструкции как открытой сложной самоорганизующейся системы позволило выделить в качестве объективно существующих процессы самоорганизации. Представляется существенным, что развитие различных по механизмам проявления спонтанных процессов структурной организации, ведет к образованию сходных по значению структурных элементов – трещин и внутренних поверхностей раздела. Эти элементы присутствуют в материале изделия на всех уровнях структурных неоднородностей. Они являются участниками практически всех процессов внутреннего массопереноса, распределения и диссипации энер-

гии, связанной с развитием собственных деформаций и при внешних воздействиях. Сам факт наличия трещин на каждом уровне структурной неоднородности сохраняет в нем потенциальные возможности дальнейших структурных изменений. Кроме того, анализ явлений самоорганизации позволяет заключить о структурном разнообразии каждого уровня неоднородности, что должно положительно сказаться на способности открытой системы сопротивляться внешним воздействиям.

Явления спонтанной структурной перестройки не заканчиваются после завершения этапа становления системы. Наличие активных элементов позволяет системе оставаться в определенной динамике саморазвития в течение всего периода выполнения заложенных в нее функций. Это предполагает дальнейший анализ, с учетом синергетического подхода, структурных изменений при действии на "зрелую" систему эксплуатационных нагрузок.

8.4. Самоорганизация материала конструкции как открытой системы

Явления самоорганизации происходят в отдельных подсистемах и в системе в целом в период ее создания как системы, в период выполнения заложенных в нее функций и в период ее деградации и гибели. Можно утверждать, что спонтанная переорганизация структуры является необходимым условием поддержания геомоста за сложных динамических открытых систем в процессе их жизни. При этом возникает вопрос – при постоянном протекании самодвижущихся процессов изменения внутренней архитектуры, можно ли прогнозировать и целенаправленно влиять на направление процесса с целью поддержания свойств системы на требуемом уровне? Ранее было рассмотрено, что субъект, как создатель искусственных систем, выступает в качестве необходимого и доминирующего элемента в общем цикле "жизни" системы. Это дает основание утверждать, что субъект может и обязан разработать и реализовать через моделирование ситуаций такую интегральную структуру системы, при которой в системе самозарождается определенный набор структурных элементов, который позволяет путем изменения их параметров поддерживать открытую систему в рабочем состоянии. Вопросы организации структуры в требуемом направлении на различных уровнях структурных неоднородностей (подсистем) и динамичной системы в целом будут рассмотрены в соответствующих разделах. В данном разделе обсуждаются вопросы самоорганизации открытой динамичной системы со сложившимися структурными особенностями в процессе ее активной жизни.

Для анализа выделим плоский фрагмент системы с определенным набором активных элементов структуры (рис.8.4).

Ограничение по качественному составу элементов структуры связано не с недооценкой роли других структурных составляющих, а с тем, что только реакция активных элементов позволит (или не позволит) проявить свои способности консервативным и метастабильным структурным составляющим.

В предложенном фрагменте модели структуры не выделены уровни структурных неоднородностей системы. Это сделано сознательно в предположении, что характерные уровни структурных неоднородностей "самоподобны" по распределению в них активных элементов, что характерно для фрактальных систем [].

Количество и ориентирование активных элементов в принятой модели характерно для реальных композиций из цементного камня (рис.8.5,а) и бетона (рис.8.5,б).

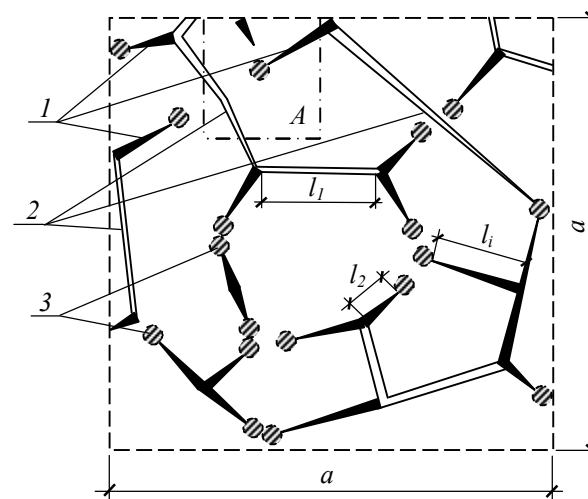


Рис.8.4. Фрагмент модели структуры конструкции как сложной динамичной открытой системы.

1 – технологические трещины; 2 – внутренние поверхности раздела; 3 – зоны концентрации деформаций и напряжений у устья технологических трещин.

Ограничение по количеству уровней структурных неоднородностей связано также с тем, что доступные авторам средства визуализации активных элементов не позволяют их фиксировать на уровне продуктов новообразований. Поэтому из общей модели структуры конструкции (рис.8.4) вычленен фрагмент модели с двумя уровнями структурных неоднородностей (например, бетон и растворная часть или растворная составляющая и цементный камень). При ана-

лизе принято, что представленные на фрагменте модели структуры активные элементы образовались в период становления системы (технологический период) и присутствуют в системе до приложения к ней эксплуатационных нагрузок. Под эксплуатационными нагрузками понимаются нормативные постоянно действующие силовые нагрузки и нагрузки, связанные с изменением состояния среды эксплуатации. Изменение состояния среды эксплуатации предполагает возникновение градиентов температуры, влажности, агрессивное химическое воздействие и т.п. При анализе не выделяется конкретный вид воздействия в предположении, что конструкция, как открытая система, реагирует на любое внешнее воздействие.

Площадь фрагмента модели структуры составляет $S_M = a^2$ (рис.8.4). В выделенном фрагменте присутствуют ТТ (1) и ВПР (2). Неравномерное распределение деформаций и напряжений вдоль берегов трещины предполагает их концентрацию у устья. Зоны концентрации деформаций и напряжений (3) неравномерно распределены по площади фрагмента.

В работах [] предложено оценивать поврежденность материала по количеству трещин в единице объема материала; по отношению объема трещин к объему материала, в котором они образовались; по отношению протяженности трещин к площади поверхности образца, на которой они проявились. При этом, как показал проведенный анализ, поврежденность не разделяется на, собственно, трещины и внутренние поверхности раздела. Наличие трещин предполагает, что в системе существуют локальные участки концентрации деформаций и напряжений. Это ведет к возникновению в материале градиентов деформаций и напряжений. Сами трещины можно представить как нестабильный элемент структуры. Стабильность каждой трещины носит временный характер. Внешние воздействия, которые вызывают деформирование материала, могут вывести трещину из равновесия, что приведет к ее подрастанию. В свою очередь, подрастание отдельных трещин приведет к очередному этапу перераспределения локальных концентраций деформаций и напряжений. По мере роста отдельных трещин в материале возникает деформационная "волна", которая, накладываясь на зону концентрации напряжений у устья "законсервированных" трещин, способна их "расконсервировать" и привести к подрастанию. В силу того, что коэффициенты концентрации напряжений определяются, при прочих равных условиях, геометрическими характеристиками трещин, то в первую очередь начнут развиваться трещины, имеющие наибольшую длину на своем уровне структурных неоднородностей. Именно они являются источником нестабильности для данного уровня. Причинами начала развития трещин могут быть напряжения растяжения (K_{Ic}), напряжения сдвига в продольном (K_{IIc}) и поперечном (K_{IIIc}) направлениях []. Это связано с тем, что при любом внешнем воздействии де-

формации и напряжения передаются на берега трещины неравномерно в силу их различного ориентирования друг относительно друга.

Таким образом, сам факт существования трещин делает систему нестабильной, внутренне возбужденной. При этом нестабильным элементом является трещина, провоцируя возникновение градиентов деформаций и напряжений в окружающем материале.

Для перехода в более равновесное состояние ТТ должна закончить свое существование на данном уровне структурной неоднородности путем потери своих основных отличительных признаков – устья и фронта трещины.

Рассмотрим возможный механизм перехода системы в более равновесное состояние. Для этого из фрагмента модели структуры системы (рис.8.4) выделим участок А, который содержит ТТ и ВПР (рис.8.5,а).

Приложим к системе воздействия, которые вызывают рост ТТ от начального состояния ($O\tau_0$) через промежуточные ($O\tau_i$) до конечного состояния ($O\tau_K$). По мере роста трещины впереди ее устья продвигается зона концентрации деформаций и напряжений, вызывая возникновение "волны" деформаций в материале. Возникающие деформации инициируются естественным для трещины неравномерным их распределением и звуковыми колебаниями, возникающими при увеличении площади берегов растущей трещины (эффект звуковой эмиссии) []. Не исключены ситуации, при которых распространяющиеся деформационные волны попадают в зону концентрации напряжений соседних ТТ. Это может привести к повышению значений коэффициента интенсивности напряжений до критических значений, при которых нарушается равновесие трещины и она сдвигается с места. По мере роста инициируется волна новых деформаций, которая, взаимодействуя с волной деформаций первой трещины, интенсифицирует ее необратимый рост.

В момент начала роста ТТ они начинают изменять свои геометрические параметры (увеличиваются длина и площадь поверхности берегов). Таким образом технологические трещины, как базовый активный элемент структуры, превращаются в эксплуатационные трещины.

Под эксплуатационными трещинами (ЭТ) понимаются несплошности, у которых расстояние между противоположными плоскостями (берегами) намного меньше их длины и противоположные плоскости при смыкании образуют устье и фронт трещины. Эксплуатационные трещины развиваются из ТТ и других несплошностей в материале (например, из пор, капилляров). Они характеризуются длиной, радиусом устья, длиной линии фронта, рельефом берегов. ЭТ относятся к активным элементам структуры, так как они, по определению, сами являются

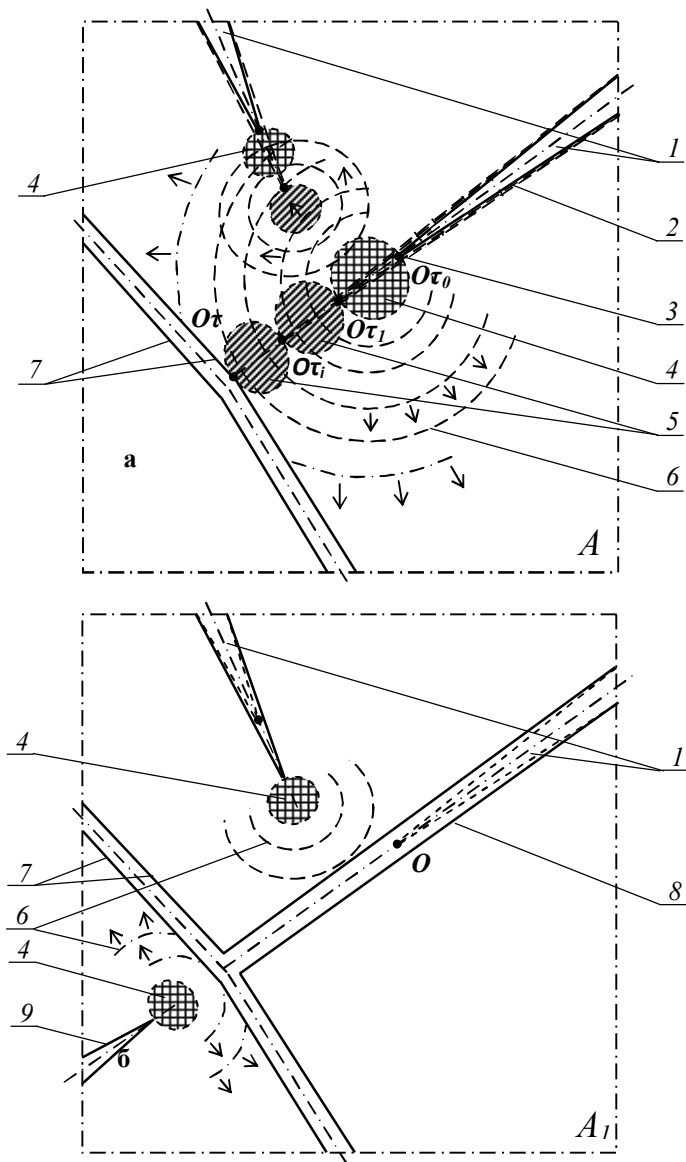


Рис.8.5. Схема трансформации трещины в ВПР.

а – рост ТТ; **б** – модель структуры после превращения ТТ в ВПР; 1 – ТТ; 2 – берега ТТ; 3 – устье ТТ; 4 – зона концентрации деформаций и напряжений; 5 – продвижение зоны концентрации деформаций и напряжений; 6 – деформацион-

ные волны в материале; 7 – берега ВПР; 8 – берега новой ВПР; 9 – подрастающая ТТ.

неравновесными, возбуждают в системе градиенты деформаций и напряжений и в одном темпоритме реагируют на внешние воздействия.

Превращение ТТ в ЭТ изменяет структуру материала, но при этом не ведет к установлению равновесия в системе. Релаксация локального напряженно-деформационного состояния происходит при выходе ЭТ на берега ВПР. В этом случае трещина теряет свой основной элемент – устье. Энергия, которую трещина подвела к границе раздела, расходуется на увеличение ширины раскрытия бывшей трещины в зоне её выхода на берег ВПР. В системе произошли качественные изменения, связанные с превращением эксплуатационной трещины в новую для системы поверхность раздела. Аналогичные процессы происходят при выклинивании одной трещины на берега другой трещины, что одну трещину превращает в ВПР, а рост другой может приостановиться за счет нарушения целостности одного из берегов. Завершающий цикл превращения трещины в границу раздела представлен на рис. 8.5б. В результате превращения ТТ в ЭТ и во внутренние поверхности раздела изменяется структура отдельного уровня структурной неоднородности (подсистемы) и системы в целом. В структуре возникают (самозарождаются) новые для системы элементы – структурные блоки (рис.8.6).

Возникновение структурных блоков связано с превращением эксплуатационных трещин в новые для системы поверхности раздела. Под структурными блоками понимаются дискретные элементы структуры, которые отделены от основного материала данного уровня структурной неоднородности берегами ВПР и берегами ЭТ. Структурные блоки могут быть завершёнными в своем развитии. В этом случае их внешними границами являются берега ВПР. Если часть внешних границ представлена берегами трещин, то такие блоки следует отнести к незавершённым в своем развитии. Структурные блоки могут образовываться на всех уровнях структурных неоднородностей (подсистемах). Это предполагает, что каждый блок содержит характерный для него набор консервативных, метастабильных и активных элементов структуры. Образование структурных блоков на всех структурных уровнях свидетельствует о проявлении явлений самоподобия в динамических системах.

По нашему мнению, возникновение структурных блоков следует отнести к спонтанному проявлению процессов самоорганизации при внешнем подводе к системе энергии. Образование блочной структуры можно отнести к непрерывающемуся процессу структурной адаптации в условиях постоянно действующего внешнего воздействия. Суть непрерывающегося процесса заключается в пост-

янном образовании дискретных структур, как на различных уровнях структурных неоднородностей, так и на различных участках на одном структурном уровне. При этом образование каждого структурного блока циклично и связано с дискретными актами изменения параметров трещин и ВПР. Можно заключить, что непрерывность процесса образования структурных блоков определяется дискретными актами изменения параметров активных структурных элементов.

Образование структурных блоков различного вида на разных структурных уровнях способствует диссипации избыточной энергии, связанной с внутренними и внешними факторами. Различные формы и ориентирование блоков друг относительно друга способствуют перераспределению деформаций,

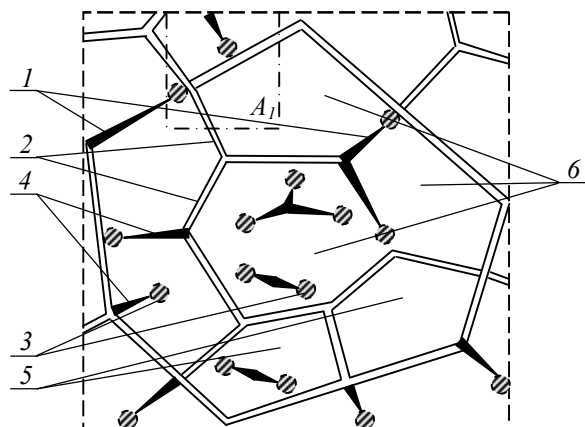


Рис.8.6. Структурные изменения в модели структуры системы.

1 – ТТ; 2 – ВПР; 3 – зоны концентрации деформаций и напряжений у устья ТТ и ЭТ; 4 – ЭТ; 5 – структурные блоки в завершённом виде; 6 – незавершённые в своем развитии структурные блоки.

возникающих в системе. Изменение ширины раскрытия ВПР и трещин создают условия для "подвижки" блоков и возможного изменения их ориентирования. Идея непрерывной передачи деформаций от одной точки тела к другой для структурируемой среды теряет первоначальный конструктивный смысл. При блочном строении могут возникать локальные деформации, которые гасятся на границах раздела блоков. Часть энергии деформаций тратится на изменение параметров активных элементов структуры, часть – на трансформацию трещин в поверхности раздела, как на внешних границах блока, так и в объеме блока.

Проведенный анализ показывает, что в результате изменения параметров активных элементов структуры и трансформации трещин в поверхности раздела в отдельных подсистемах и в системе в целом возникают новые их составляющие – структурные блоки.

Для прогнозирования поведения открытой динамической системы при действии на нее эксплуатационных нагрузок необходимо разработать методику количественной

оценки спонтанных структурных изменений. Выше было отмечено, что активные элементы структуры формируют поврежденность всей системы и отдельных подсистем. В работах [] поврежденность цементного камня и бетона технологическими и эксплуатационными дефектами предложено оценивать при помощи коэффициентов поврежденности K_{II} . Для определения K_{II} предложено общую протяженность дефектов соотнести с площадью поверхности, на которой они проявились. Общая протяженность L определяется как сумма длин активных элементов: $L = l_1 + l_2 + l_i$. В рассматриваемом случае (рис.8.4) $K_{II} = L / a^2$ ($см/см^2$).

Физическая сущность K_{II} заключается в определении протяженности (длины) активных элементов на площади в $см^2$. Предложенный метод позволяет оценить изменение интегральной поврежденности после структурных изменений, произошедших в материале при действии на него внешних нагрузок. Однако он не позволяет оценить изменение параметров активных элементов в зависимости от их вида. Для этого можно ввести два коэффициента, один из которых позволяет оценить поврежденность через общую протяженность трещин ($K_{II}^T = L_T / S$), а другой – через протяженность ВПР ($K_{II}^{IP} = L_{IP} / S$). Изменение поврежденности можно оценить из соотношения: $\Delta K_{II} = K_{II} / K_{II0}$, где ΔK_{II} – изменение поврежденности; K_{II0} – коэффициент технологической поврежденности; K_{II} – коэффициент поврежденности после воздействия на систему эксплуатационных нагрузок.

Трудность реализации данного метода заключается в достаточно сложной методике обнаружения, фиксации и определения протяженности активных элементов на поверхности образца. Кроме того, проявленные трещины могут принадлежать разным уровням структурных неоднородностей, а методика предполагает соотносить их с уровнем образца (конструкции). Это не позволяет объективно оценить роль активных структурных элементов в формировании свойств материалов как сложных систем (полиструктурных материалов).

Анализ поверхностей разрушения образцов после определения прочности на растяжение при изгибе показал, что разрушающая трещина имеет достаточно сложную траекторию развития. Испытание образцов с проявленными техноло-

гическими и эксплуатационными трещинами позволило установить, что трещина разрушения проходит, как правило, по уже существующим трещинам и ВПР. Это подтвердило влияние структуры на характер разрушения сложноорганизованных материалов и дало возможность предложить методику определения K_{II} , при которой определяется фактическая протяженность трещины разрушения L_T : $K_{II} = L_T / L_0$, где L_0 – высота образца []. После испытания образцов K_{II} можно определить из зависимости: $K_{II} = S_T / S_0$, где S_T – площадь поверхности разрушения образца; S_0 – номинальная площадь поверхности сечения образца. Предложенный метод определения K_{II} основывается на энергетическом подходе, при котором предполагается, что магистральная трещина стремится при своем росте минимизировать высвобождающуюся поверхностную энергию за счет минимизации площади поверхности берегов трещины []. К существенным недостаткам данной методики определения K_{II} можно отнести установленные факты определения одинаковой длины трещин разрушения (равной площади поверхности разрушения) при существенно различных рельефах берегов трещин (площадок разрушения). Косвенную оценку поврежденности можно получить из выражения: $K_{II} = S_B / S_0$, где S_B – площадь единичного структурного блока; S_0 – площадь одной из граней образца.

Рассмотренные методы количественной оценки поврежденности далеки от совершенства и, к сожалению, не всегда позволяют оценить "полезность" или "опасность" отдельных элементов структуры. В то же время при помощи K_{II} можно оценить влияние рецептурно-технологических факторов на изменение поврежденности цементного камня и бетона []. Более информационно насыщены результаты по изменению K_{II} при эксплуатации материала в условиях многократного увлажнения и высушивания [], замораживания и оттаивания [], действия динамических силовых нагрузок []. Эти исследования позволили рекомендовать методы направленного изменения технологической поврежденности с целью прогнозируемого изменения K_{II} для обеспечения требуемой стойкости материала с учетом условий его эксплуатации.

Приведенные данные по количественной оценке поврежденности материалов технологическими дефектами и, в зависимости от условий внешнего воздействия, изменению эксплуатационной поврежденности, подтверждают активность существования активных элементов в виде трещин и ВПР на отдельных уровнях структурных неоднородностей (цементный камень, раствор) и в самом материале (бетон).

Анализ возможных процессов реагирования активных элементов показывает, что они способны самопроизвольно изменять свои параметры, изменяя тем самым структуру отдельных подсистем и самой системы. Задача субъекта, как необходимого элемента структуры искусственной системы, заключается в

том, чтобы, зная основные механизмы самоорганизации, заложить в структуру определенный набор активных составляющих, который позволил бы путем изменения своих параметров (структурных изменений) обеспечить безопасность системы в период эксплуатации. Это не означает, что внутренняя безопасность системы связана только лишь с самопроизвольным изменением параметров активных элементов структуры. Как уже отмечалось выше, роль активных элементов заключается в адекватном реагировании на внутренние и внешние воздействия – создавать в отдельных подсистемах такую структурную переорганизацию, которая позволяет включить в работу созидательные составляющие метастабильных и конструктивных элементов структуры. Такая задача может быть решена только лишь в случаях создания резерва времени, например, для протекания процессов "самозалечивания" [] или для проявления свойств адаптации за счет реакций гидратации реликтовых зерен цемента []. По мнению авторов, необходимый резерв времени может создать только структурная переорганизация, инициируемая изменением параметров активных элементов на различных уровнях структурных неоднородностей. Поэтому, при рассмотрении явлений самоорганизации материала конструкций как открытых динамических систем, основное внимание уделяется спонтанной перестройке структуры за счет трансформации активных элементов. Это явилось основной причиной принятия, в качестве базовой, модели структуры конструкции в виде определенного набора активных элементов, которые являются необходимыми составляющими, как отдельных подсистем, так и системы в целом.

Таким образом, явления самоорганизации материала конструкций как открытых динамических систем следует считать объективным процессом. Движущей силой самоорганизации являются неравновесные активные элементы структуры, которые при изменении условий эксплуатации стремятся перейти в более равновесное состояние путем изменения своих параметров. Инициаторами спонтанных процессов перестройки структуры являются активные элементы, которые "закладываются" в отдельные подсистемы и в систему в целом в технологический период ее создания. Технологические (остаточные, начальные, генетические, наследственные) трещины и внутренние поверхности раздела выступают в роли инициаторов процессов и явлений самоорганизации при действии на систему всего комплекса эксплуатационных нагрузок. На этом их роль в дальнейшем развитии процессов заканчивается, поскольку они переходят в ранг эксплуатационных активных структурных элементов. Эксплуатационные трещины и внутренние поверхности генетически связаны с технологическими и продолжают участвовать в дальнейших процессах спонтанной структурной "настройки" системы на безопасную работу в условиях различных внутренних и внешних воздействий. Это направление самоорганизации следует рассматривать в каче-

стве единственно приемлемого. При "неудачном" начальном заложении технологических активных элементов их дальнейшее саморазвитие может привести к преждевременной деградации системы и ее гибели. Поэтому, и в этом позиция авторов, при проектировании конструкций следует обязательно учитывать работу материала и, особенно, способность материала адаптироваться через структурную перестройку к условиям эксплуатации конструкции.

8.5. Принципы самосогласованной работы активных и метастабильных элементов структуры

В предыдущих разделах рассмотрены возможные механизмы самоорганизации материала на различных уровнях структурных неоднородностей в технологический период изготовления конструкций и в период ее эксплуатации. Показано, что при получении материала и его переработки в изделия все структурные элементы активно участвуют в процессах организации структуры конструкции. В этот период реализуется общесистемный принцип саморазвития конструкции как системы. В системе самозарождаются новые для нее структурные элементы – технологические трещины и внутренние поверхности раздела и формируются локальные и интегральные поля остаточных (технологических, наследственных, начальных) напряжений и деформаций. При этом установлено, что при самозарождении новых для системы структурных элементов проявляется такая общесистемная закономерность как эквифинальность – достижение одинакового результата различными методами или путями. Анализ показал принципиальное различие механизмов организации структуры бетонов на различных уровнях структурных неоднородностей. Установлено, что в результате различных по принципу действия механизмов структурообразования на каждом уровне структурных неоднородностей возникают одинаковые по качественным признакам структурные элементы ТТ и ВПР. Таким образом можно считать, что технологический период создания конструкции как системы завершается при образовании в ней определенного набора активных, метастабильных и консервативных структурных элементов, которые должны обеспечить потенциал системы. В свою очередь потенциал системы зависит от степени ее организованности и характера взаимодействия структурных элементов / / . Для полной реализации потенциальных возможностей системы в период ее активной жизни (эксплуатации) необходимо учитывать взаимодействие и взаимовлияние качественно несхожих с различными механизмами своего проявления элементов структуры и их групп. Это дает основание предположить, что для обеспечения внутренней безопасности строительной конструкции как открытой системы, в материале должны протекать гармоничные самосогласованные процессы перестройки структуры в

направлении сохранения на заданном уровне комплекса заданных свойств. Это ставит задачу выявления, анализа и исследования вероятных механизмов структурных изменений в материале конструкции при действии на нее эксплуатационных нагрузок.

В разделе 8.4. предложены механизмы изменения параметров активных элементов структуры сложноорганизованных материалов. Особенно подчеркивается созидательная роль ТТ и ВПР при их трансформации в эксплуатационные трещины (ЭТ) и эксплуатационные внутренние поверхности раздела (ЭВПР), которая заключается в диссипации избыточной энергии на различных уровнях структурных неоднородностей. К созидательной роли можно отнести, по нашему мнению, способность активных элементов создавать условия для включения в работу метастабильных элементов структуры, к которым можно отнести, как показано в [6], реликтовые участки зерен минерального вяжущего.

Минеральные вяжущие и материалы на их основе можно отнести к особому классу материалов, которые имеют длительный, сопоставимый с нормируемым временем эксплуатации, внутренний ресурс химически активных составляющих, которые способны при определенных условиях, пополнять, восстанавливать и поддерживать внутреннюю материальную среду, обеспечивать сохранение требуемых свойств. Такое представление позволило В.Л. Чернявскому [8] отнести бетон и железобетон к *абиотическим* системам, проявляющим свойства *адаптации* в условиях воздействия внешней среды.

Включение механизмов адаптации через поздние физико-химические процессы и явления гидратации может произойти при создании условий взаимодействия реликтовых зерен с жидкой фазой. Происходящие при этом физико-химические процессы появления продуктов новой фазы, их структурное оформление в теле материала и возможные явления диффузионного массопереноса для проявления явлений "самозалечивания" имеют определенный временной цикл, который может не совпадать (запаздывать) со временем развития структурных элементов, которые могут вызывать ненормируемое снижение свойств материала. Можно заключить, что для успешной реализации эффектов физико-химической адаптации необходимо обеспечить определенный временной интервал, в течение которого система "позволит" включить в работу ресурсы негидратированных составляющих. Для этого необходимо, чтобы изменение параметров активных элементов способствовало такой структурной перестройке, при которой привнесенная энергия расходовалась на подрастание ТТ с выходом фронта на ВПР, образование новых внутренних поверхностей раздела, увеличение ширины раскрытия трещин и ВПР, и образование новых для системы структурных составляющих – завершенных и незавершенных в своем развитии структурных блоков []. Подобные структурные перестройки, особенно если они протекают в

объеме блоков на различных уровнях структурных неоднородностей, способны, с одной стороны, не вызывать значительные изменения свойств материала и, с другой стороны, активизировать весь комплекс физико-химических процессов с обеспечением временного интервала для реализации их конструктивной роли. Необходимым условием для реализации проявления комплексных процессов адаптации можно считать согласование в определенном временном интервале реакции на внешние события активных и метастабильных элементов структуры. Принципиальная схема самосогласованного режима работы активных и метастабильных элементов представлена на рис. 8.7.

На этапе создания строительной конструкции как открытой системы (технологический период, τ_T) все элементы структуры активно участвуют в процессах организации структуры. Отличительной особенностью технологического периода можно считать зарождение, развитие и сохранение в материале конструкции элементов, которые могут обеспечить безопасную работу системы в период действия на конструкцию всего комплекса эксплуатационных нагрузок ($\tau_Э$). Особенное внимание таким элементам уделяется в связи с тем, что требуемый набор свойств может быть достигнут при очень разнообразном структурном оформлении материала. Однако достаточно чтобы в образовавшейся структуре изменились параметры структурных элементов или произошло их перераспределение, чтобы уровень свойств вышел за рамки допустимых значений. Поэтому важно в технологический период обеспечить определенный набор активных, метастабильных и пассивных элементов при котором могли бы успешно реализовываться процессы самоорганизации, обеспечивая тем самым сохранение

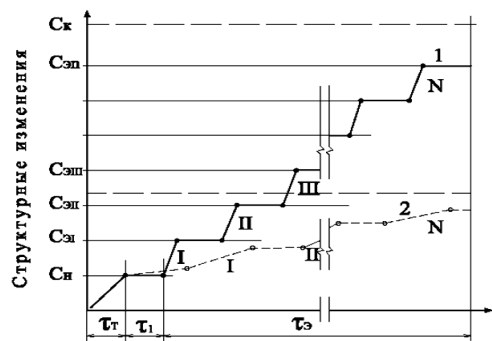


Рис.8.7. Принципиальная схема взаимодействия активных и метастабильных элементов структуры материала в период эксплуатации конструкции.

τ_T , τ_I , $\tau_Э$ – технологический, предэксплуатационный и эксплуатационный периоды жизни конструкции как открытой системы; C_n , $C_{ЭI}$, ... $C_{ЭN}$ – начальные и эксплуатационные структурные изменения; C_k – критическое изменение структуры; I, II, ... N – периоды внешних воздействий на материал конструкции.

1 – изменения параметров активных элементов; 2 – изменения параметров метастабильных элементов.

функциональных свойств материала на весь нормируемый период эксплуатации конструкции. Примем, что после завершения технологического периода в материале сформировался начальный определенный набор структурных элементов C_n . Можно выделить определенный временной интервал τ_I до начала действия на конструкцию эксплуатационных нагрузок. В этот период практически не происходит изменение параметров активных элементов структуры. Возможные структурные изменения могут быть связаны с практически непрекращающимися процессами гидратации исходных зерен вяжущего и структурной трансформацией продуктов новообразования (кривая 2 на рис. 8.8).

При действии на конструкцию эксплуатационных нагрузок (нормируемые силовые статичные и динамичные воздействия, воздействия температурно-влажностных градиентов и т.п.) активные структурные элементы материала начинают изменять свои параметры, что ведет к структурным изменениям конструкции $C_{ЭI}$ (кривая 1, рис.8.8). Можно предположить, что подрастание трещин, которое сопровождается увеличением площади поверхности ее берегов, позволяет включать в обменные химические реакции еще негидратированные зерна цемента. Подобный процесс должен быть реализован в течение определенного временного интервала. Подрастание трещин сопровождается увеличением ее объема, что вызывает перенос поровой жидкости в образовавшиеся свободные объемы трещины. После этого происходит перераспределение форм связи жидкой фазы вдоль берегов трещины и оводнение минералов, которые проявились на новых поверхностях, что инициирует физико-химические процессы гидратации. Возникновение продуктов новообразований, создание зародышей, рост кристаллов и образование гелевидной составляющей растянуты во времени по сравнению с временем реакции активных элементов на внешние события. Можно заключить, что метастабильные элементы обладают определенной инертностью, однако, могут развиваться после завершения структурной перестройки за счет изменения параметров активных элементов. После блокировки свежих поверхностей продуктами новообразований интенсивность протекания физико-химических процессов затухает, и система переходит в более равновесное, метастабильное состояние. Такое состояние может сохраняться до очередных воздействий на конструкцию эксплуатационных нагрузок, что приведет к поэтапным структурным изменениям $C_{ЭII}$, $C_{ЭIII}$, ... $C_{ЭN}$.

Каждое структурное изменение $C_Э$ включает в себя изменение параметров активных и метастабильных элементов. При этом они должны взаимодействовать в самосогласованном временном режиме. Метастабильные элементы долж-

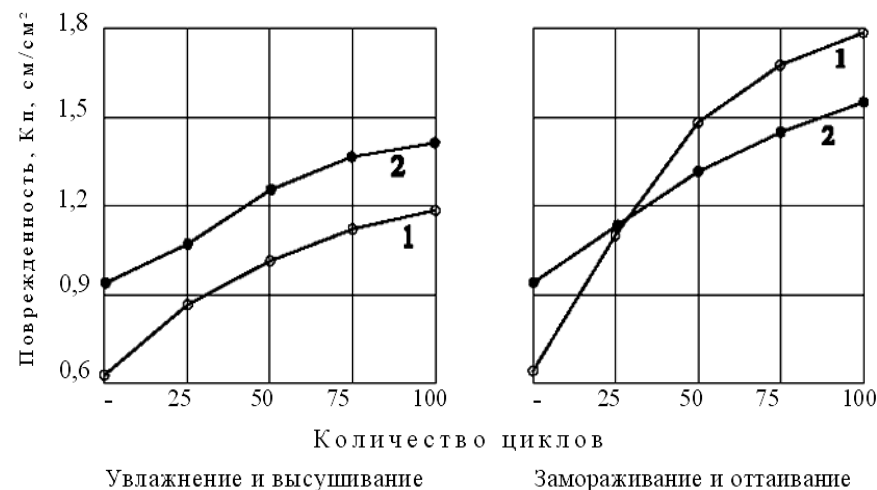
ны реализовывать свои ресурсные возможности в определенном темпоритме, при котором новые материальные поступления явились бы фактором, сдерживающем непредсказуемое изменение активных элементов. Это можно осуществить при начальном заданном распределении активных элементов на всех уровнях структурных неоднородностей. Основной задачей структурных трансформаций материала конструкций является выполнение требований, при которых критическое изменение структуры должно наступить не ранее нормируемого периода функционирования конструкции. Под критическим изменением структуры понимаются такие структурные преобразования, при которых происходит ненормируемое снижение уровня свойств. Анализ позволил заключить, что даже при исчерпании восстанавливающих возможностей метастабильных структурных элементов система может сохранять свои основные функции в определенном временном интервале. В то же время, рост эксплуатационных трещин до критического значения может привести к потере функциональных свойств конструкции при значительных потенциальных ресурсах метастабильных элементов материала. Поэтому особое внимание следует уделять образованию и развитию активных элементов в структуре материала и, следовательно, конструкции.

Для подтверждения изменения параметров активных элементов при действии на материал малоциклового нагружения, связанной с изменением температурно-влажностного режима эксплуатации, был проведен ряд экспериментов. Управление начальным распределением активных элементов в цементный камень с $V/C = 0,28$ вводили кварцевый наполнитель с $S_y = 100 \text{ м}^2/\text{кг}$ в количестве 20% по массе. Использование накопителя в качестве управляющего фактора позволило изменить поврежденность цементного камня технологическими дефектами до 50%. В свою очередь, изменение технологической поврежденности привело к изменению наполнения эксплуатационных трещин и внутренних поверхностей раздела в условиях малоциклового нагружения (рис.8.8).

Как показали исследования после 100 циклов увлажнения и высушивания, коэффициент поврежденности ненаполненного цементного камня увеличился в 2 раза, а после замораживания и оттаивания – в 3 раза (кривая 1, рис.8.8 а и б). Коэффициент поврежденности цементных композиций с наполнителями при этом изменился на 56-67%. Изменение поврежденности привело к изменению стойкости цементных композиций как в условиях многократного увлажнения и высушивания [], так и замораживания и оттаивания [].

Проведенный комплекс экспериментальных исследований позволяет заключить, что активные элементы являются объективно существующими необходимыми структурными составляющими, во многом определяющими физико-технические свойства материала и функциональную стабильность конструкции в

условиях эксплуатационных воздействий. Для проявления созидательной роли активных элементов структуры необходимо обеспечить такое их начальное рас-



пределение на различных уровнях структурных неоднородностей, при котором они были бы способны включать в работу метастабильные элементы и режиме самосогласования обеспечить структурные изменения системы без потери ее функционального назначения.

Рис.8.8. Изменение поврежденности в условиях малоцикловых эксплуатационных воздействий.

1 – цементный камень ($V/C = 0,28$); цементный камень с наполнителем ($V/C = 0,28$; $H = 20\%$; $S_y = 100 \text{ м}^2/\text{кг}$).

"...пчела - пыльца - листва;
и дальше: улей - гул - и плод;
там есть во всем такая тайна... "
(Неруда П. "Далеко, очень далеко ")

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Композиционные строительные материалы представляют собой сложно-организованные структуры, физико-технические свойства которых определяются как свойствами исходных компонентов, так и модификацией этих свойств в результате межструктурных взаимодействий. Раскрытие всех возможных проявлений таких взаимодействий - одна из задач современных теории и практики строительного материаловедения.

Полиструктурная теория композиционных строительных материалов позволяет с единых позиций рассмотреть структурообразование и разрушение строительных материалов различной природы и назначения. Физико-механические процессы структурообразования КСМ на различных структурных уровнях, механизм развития деформационных процессов, зарождение и развитие технологических трещин (вопросы, поднятые в данной работе) далеко не полностью раскрывают явление синтеза материалов и совершенствования технологии их производства. Это только один из путей направленного структурообразования КСМ.

Экстенсивные технологии строительных материалов не перспективны. Требуется разрабатывать интенсивные технологические процессы, которые позволяют резко увеличить производительность производственных мощностей без дополнительных затрат достаточно дорогих и дефицитных связующих. Одним из путей интенсификации производства КСМ на минеральных вяжущих является наполнение микроструктуры (связующих) дисперсными частичками оптимальных поверхностной активности и размера. Опыт показывает, что введение наполнителей до 40% ведет к повышению прочности цементных композиций. Очевидно, это не предел. Требуются дополнительные физико-химические исследования и исследования механизма твердения и структурообразования, как микроструктуры КСМ, так и ее соединения с макроструктурой.

Композиционные строительные материалы, как правило, не существуют сами по себе. Их свойства проявляются в композиционных строительных конструкциях. Назрела необходимость проектирования оптимальных структур материала в зависимости от вида и назначения конструкции. Это также позволит рационально использовать отдельные компоненты для получения конструкций с направленными свойствами материала.

Успешное решение теоретических и практических задач в области технологии композиционных строительных материалов зависит от глубины и широты наших знаний о процессах синтеза на каждом структурном уровне, взаимодействия структурных составляющих между собой с проявлением новых свойств в готовом продукте. Это позволит целенаправленным структурообразованием прогнозировать конечные свойства материала в конструкции и перейти на интенсивную управляемую технологию КСМ.

Адаптация – (от лат. adaptatio – приспособление) – приспособление самоорганизующихся систем к изменяющимся условиям окружающей среды.

Адаптивная система – система, автоматически изменяющая свою структуру с целью сохранения определенного состояния при изменении внешних условий. То же, что и самоприспосабливающаяся система.

Аттрактор – (от лат. attraho – притягиваю к себе) – предельная траектория точки в фазовом пространстве рассматриваемой динамической системы, к которому из некоторой его окрестности притягиваются все фазовые траектории.

Бифуркация – (от лат. bifurcus – раздвоенный) – явление перестройки структуры аттракторов системы, вызванное изменением управляющих параметров или спонтанным переходом в точку неустойчивости. Бифуркация связана с изменением структуры системы.

Внутренние поверхности раздела (ВПР) – несплошности материала, которые образовались при развитии трещин до их выхода на поверхность берегов других трещин или внутренних поверхностей раздела. Под ВПР понимают ПР между матричным материалом и поверхностью заполнителей и других элементов (включений, арматуры и т.п.).

Гетерогенные материалы – (от греч. heteros – другой) материалы, состоящие из различных по физическим свойствам и химическому составу частей, разделенных границами раздела.

Гомеостат – (от греч. homoios – подобный, одинаковый) – способность поддерживать некоторые параметры в необходимых для существования системы пределах.

Граница раздела (ГР) – поверхность разделения дискретных составляющих (компонентов, фаз, структур) гетерогенных материалов. Граница раздела характеризует площадь поверхности составляющих, их форму, рельеф и т.п.

Динамическая система – система, поведение которой в значительной степени определяется начальным состоянием.

Диссипация – (от лат. dissipation - рассеяние) – переход части энергии упорядоченных процессов в энергию неупорядоченных процессов.

Диссипативные системы – системы, полная энергия которых при движении убывает, переходя в другие виды энергии.

Диссипативные структуры – структуры, способные самопроизвольно возникать и развиваться в диссипативных системах в условиях неравновесных термодинамических состояниях.

Заполнители – компоненты КСМ произвольных формы и поверхностной активности, размер которых вызывает самопроизвольное формирование в окру-

жающем матричном материале собственное поле деформаций и напряжений при их взаимодействии как на стадии получения материала, так и при действии на материал эксплуатационных нагрузок. Заполнители могут представлять собой полиструктурные материалы с определенной поврежденностью. Характеризуются набором нормируемых параметров (например, прочностью, плотностью, фракционным составом и т.п.).

Катастрофа – (от греч. catastrophe – поворот, переворот) – скачкообразное изменение в виде ответа системы на изменение внешних условий.

Кластер – (от англ. cluster – гроздь, рой, скопление) – содружество частиц, образованное по различным механизмам, в котором индивидуальные свойства каждой частицы трансформируются в интегральные свойства их содружества. Различают фрактальные и перколяционные кластеры. Характеризуются формой, размером, составом, набором свойств.

Когерентность – (от лат. cohaerens – связанный, находящийся в связи) – согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов; самосогласование, замыкание друг на друге, взаимозависимость.

Компонент – (от лат. componens – составляющий) составная часть, элемент гетерогенного, композиционного материала (системы).

Матрица (матричный материал) – компонент КСМ, который заполняет пространство между заполнителями. Матричный материал сам может быть полиструктурным с определенной поврежденностью. Характеризуется набором нормируемых параметров (например, реологическими характеристиками, прочностью, плотностью и т.п.).

Межкластерные поверхности раздела – поверхности, полученные в результате образования в дисперсных системах кластеров. Межкластерную поверхность раздела можно рассматривать как одну из многих видов ВПР. Характеризуется площадью поверхности, рельефом и совокупными поверхностными явлениями.

Наполнители – компоненты КСМ произвольных формы и поверхностной активности, размер которых позволяет им участвовать в организации структуры неорганических и органических вяжущих. Характеризуются набором нормируемых параметров (например, дисперсным составом, удельной поверхностью, плотностью и т.п.).

Поверхностный слой – тонкий слой вблизи поверхности соприкосновения двух фаз (компонентов, тел, сред, структур), в котором свойства вещества отличаются от свойств его в объеме.

Поверхность раздела (ПР) – 1) микрообъем модифицированного материала на границах раздела компонентов (фаз, структур). 2) поверхность компонентов (фаз, структур) на которой проявляются (реализуются) явления и процессы,

происходящие в объеме компонентов (фаз, структур) и через которую происходит взаимодействие с другими компонентами (фазами, структурами).

Поверхностная энергия – избыток потенциальной энергии вещества у поверхности какого-либо тела по сравнению с энергией в объеме.

Поверхностные явления – совокупность явлений, обусловленных особыми свойствами тонких слоев вещества на границе соприкосновения тел (компонентов, фаз, структур). Поверхностные явления могут быть как чисто физическими, так и сопровождаться химическими превращениями вещества.

Поврежденность (П) – количество трещин и ВПР на различных уровнях структурных неоднородностей в объеме материала. П. характеризуется коэффициентом поврежденности k_n (совокупное количество Т и ВПР, отнесенное к единичному объему или к единичной площади поверхности). Различают технологическую поврежденность (ТП) (характеристика П. до приложения эксплуатационных нагрузок) и эксплуатационную поврежденность (ЭП) (изменение П. при действии на материал конструкции эксплуатационных нагрузок).

Полиструктурные материалы – материалы, организованные по типу "структура в структуре" или "композит в композите". Характеризуются выделенными структурными неоднородностями на одном или различных масштабных уровнях.

Прочность – способность материала сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы при действии внешних нагрузок. Прочность зависит не только от самого материала, но и от вида напряженного состояния (растяжение, сжатие, изгиб и др.), от условий эксплуатации (температура, скорость нагружения, длительность и число циклов нагружения, воздействия окружающей среды, состояние поверхности и т.д.).

Разрушение – макроскопическое нарушение сплошности материала в результате тех или иных воздействий на него. Различают начальное и полное разрушение, при котором происходит разделение тела на две и более части. По характеру разрушения выделяют хрупкое, пластичное, усталостное, длительное и другие виды разрушения. Теории разрушения базируются на физических, механико-математических, структурных, физико-химических моделях, объясняющих основные закономерности разрушения.

Самодвижение – движение, имеющее источник, причину в самой движущейся вещи (причина самой себя). Самопроизвольное изменение структуры системы, определяемое внутренними причинами.

Самоорганизация – самопроизвольный процесс образования устойчивых структур в самоорганизующихся системах без внешнего влияния.

Самоорганизующаяся система – самоприспосабливающаяся система, процесс адаптации которой состоит в автоматическом изменении структуры системы для компенсации внешних воздействий.

Синергетика – (от греч. synergos – вместе действующий) - междисциплинарное направление научных исследований самоорганизующихся систем.

Синхронизация – (от греч. synchronos – одновременный) – приведение двух или более процессов к синхронности, т.е. к такому протеканию, когда одинаковые или соответствующие элементы процессов совершаются с неизменным сдвигом по фазе или одновременно.

Согласование – взаимодействие, координация, регулирование, выверка, подгонка, подбор, увязка.

Структурные неоднородности – неоднородности, возникающие на ПР и ВПР при переходе от одной фазы (компонента, структуры) к другой фазе (компоненту, структуре). Характеризуются по механизму организации структур на выделенном уровне структурных неоднородностей. В общем случае, для композиций на основе минеральных вяжущих, можно выделить неоднородности на уровне продуктов новообразований (термофлуктуационный механизм организации структуры), на уровне частиц вяжущего (организация структуры с учетом межчастичных взаимодействий), на уровне растворов и бетонов (структурообразование с учетом взаимодействия матричного материала и включений).

Темпомиры – независимо существующие структуры с различными режимами развития. Интеграция различных структур системы, находящихся на различных стадиях собственного развития, в общую структуру реализуется путем установления общего темпа развития.

Термодинамическая система – макроскопическое тело, выделенное из окружающей среды при помощи перегородок или оболочек (они могут быть также и мысленными, условными), которое можно характеризовать макроскопическими параметрами: объемом, температурой, давлением и др.

Трещина – несплошность материала, которая способна концентрировать в местах смыкания деформации и напряжения, значительно отличающиеся от средних значений в объеме материала. Трещину можно характеризовать длиной, шириной раскрытия, радиусом устья, площадью берегов, длиной фронта, рельефом берегов. Берега трещины можно представить как поверхности раздела. Берега трещины характеризуются площадью поверхности, рельефом, морфологией и поверхностной энергией. Устье трещины – место смыкания противоположных берегов. Под фронтом подразумевается линия смыкания берегов трещины.

Трещины технологические (ТТ) (наследственные, генетические, начальные, остаточные) – трещины, которые возникли в период технологиче-

ской переработки материала в изделие и которые присутствуют в нем до приложения эксплуатационных нагрузок.

Трещины эксплуатационные (ТЭ) – трещины, которые возникают в материале изделий (конструкций) при действии на них эксплуатационных нагрузок.

Триггер – (от лат. trigger – защелка, спусковой механизм) - переключающее устройство, которое столь угодно долго сохраняет состояние устойчивого равновесия и скачком переключается из одного состояния в другое по сигналу извне.

Фаза – (от греч. phases – появление) однородная по химическому составу и физическим свойствам часть термодинамической системы, отделенная от других частей (фаз), имеющих иные свойства, границами раздела, на которых происходит изменение свойств.

Фрактал – (от лат. fractus – сломанный камень, расколотый и нерегулярный) – множества, обладающие свойством масштабной инвариантности. Фрактальные структуры присущи большинству сложноорганизованных систем.

Эквифинальность – (от англ. equifinality -) – динамическое свойство системы, осуществляющей движение различными путями из различных начальных состояний в одно и то же финальное состояние. Эквифинальность характеризует свойство системы приходить в некоторое состояние, определенное лишь ее собственной структурой, независимо от начального состояния и изменения внешних условий. К явлениям эквифинальности можно отнести образование одинаковых по типу элементов структуры системы, обусловленные принципиально различными причинами.

Эмерджентность – (от англ. emergent – внезапно возникающий) – такие свойства системы, которыми не обладают ее составляющие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломатов В.И. Структурообразование и технология полимербетонов //Строительные материалы - 1970. - № 9. - С. 33-34.
2. Соломатов В.И. Структурообразование полимербетонов// Применение полимерных смол в бетонных и железобетонных конструкциях. - Вильнюс: ВПИ. 1971. - С. 126-127.
3. Соломатов В.И. Прошлое и будущее армополимербетона //Труды МИИТа "Армополимербетонные и другие строительные конструкции для промышленности и транспорта". Вып. 494. - М. :МИИТ. 1975. С. 7-10.
4. Соломатов В.И.Элементы общей теории композиционных строительных материалов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 8. С. 61-70.
5. Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов// Новые композиционные материалы в строительстве. - Саратов: СПИ. 1981. С. 5-9.
6. Соломатов В.И. Структурообразование и технология полимербетонов// Механика и технология на композиционных материалах. - София: БАН. 1979. С. 343-346.
7. Армополимербетон в транспортном строительстве. / Под ред. Соломатова В.И. - М.: Транспорт. 1979. - 232 с.
8. Соломатов В.И. Полиструктурная теория искусственных строительных конгломератов// Производство и применение искусственных строительных конгломератов. - Владимир: ВПИ. 1982. С. 362-366.
9. Болотин В.В. Механика композитных материалов и конструкций// Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. - М.: Стройиздат. 1972. С. 65-98.
10. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. - М.: Мир. 1982. - 336с.
11. Келли А. Высокопрочные материалы. - М.: Мир. 1976. - 262 с.
12. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. - М.: Наука. 1983. - 296 с.
13. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. - М.: Атомиздат. 1975. - 472 с.
14. Солнцев С.С., Морозов Е.М. Разрушение стекла. - М.: Машиностроение. 1978. - 152 с.
15. Карпинос Д.М., Максимович Г.Г., Кадыров В.Х., Лютый Е.М. Прочность композиционных материалов. - Киев: Наукова думка. 1978. - 236 с.
16. Композиционные материалы. - М.: Мир. 1978. Т. 1.- 438 с. Т.2. - 564 с. Т.5. - 484 с. Т.6. - 294 с. - М.: Машиностроение: 1978. Т.3. – 510 с. Т.4. - 504 с.

17. Фудзин Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. - М.: Мир. 1982. - 232 с.

18. Кауш Г. Разрушение полимеров. - М.: Мир. 1981. - 440 с.

19. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. - Рига: Зинатне. - 1978. - 294 с.

20. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. - М.: Знание. Серия IV, - № 39, 40, 1958. - 64 с.

21. Шульц М.М. Современное состояние физико-химических основ получения силикатных материалов // Научные основы материаловедения. - М.: Наука. 1981. - С. 5-11.

22. Томашевский В.Т. О задачах механики в технологии композитных материалов // Механика композитных материалов - 1982. - №3 С. 486-503.

23. Урьев Н.В. Высококонцентрированные дисперсные системы. -М.: Химия. 1980. - 320 с.

24. Ходаков Г.С., Юдкин Ю.П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. - М.: Химия. 1981. - 192 с.

25. Федоров В.В., Шоршоров М.Х., Калашников Е.Г. и др. К термодинамике дисперсных систем // Физика и химия обработки материалов – 1976 - № 3. С. 74-81.

26. Овчаренко Ф.Д., Архипов В.В., Бирюков А.И., Плугин А.Н. Злектроповерхностные явления и оценка процессов твердения минеральных вяжущих и бетонов на их основе // Коллоидный журнал -1981.- №5. С. 877-882.

27. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошок. - М.: Химия. 1976. - 432 с.

28. Берней И.И., Белов В.В. Силы капиллярного сцепления и их влияние на технологию и свойства строительных материалов//Производство и применение асбоце мента. Калинин: КГУ. 1979. С. 3-44.

29. Современные методы оптимизации композиционных материалов. / Под ред. Вознесенского В.А. - Киев: Будівельник. 1983. - 144 с.

30. Соломатов В.И., Выровой В.Н. Кластерообразование ненаполненных и наполненных композиционных строительных материалов//Решение проблемы охраны окружающей среды путем использования отходов промышленности в композиционных материалах. - Пенза: ПДНТП. 1983. С. 5-9.

31. Выровой В.Н., Азарова С.Я., Абакумов В.В. Оптимизация безотходных и энергосберегающих технологий композиционных материалов. - Киев: Знание. 1982. - 24 с.

32. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Прошин А.П. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов//Изв. вузов. Строительство и архитектура - 1983. - № 4.

33. Соломатов. В.И., Бобрышев А.Н., Прошин А.П. О влиянии размерного фактора дисперсного наполнителя на прочность эпоксидных композитов// Механика композитных материалов - 1982 - № 6, С. 1008-1012.

34. Состав, структура и свойства цементных бетонов/Под ред. Горчакова Г.И.-М.: Стройиздат. 1976. - 145 с.

35. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. - М.: Госстройиздат. 1959. - 294с.

36. Осетинский Ю.В., Подвальный А.М.О выборе модели для расчета собственных напряжений в бетоне // Механика композитных материалов - 1982. -№ 5. С. 789-796.

37. Выровой В.Н. Физические особенности структурообразования поверхностей раздела полимерных композиционных материалов//Поверхностные явления в полимерах. - К.: Наукова думка. 1982. С. 23-26.

38. Выровой В.Н. Механизм формирования внутренних поверхностей раздела при твердении строительных композиционных материалов// Применение цементных и асфальтных бетонов в Сибири. - Омск: СибАДИ. 1983. С. 3-10.

39. Рябьев И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. - М.: Высшая школа. 1978. - 309 с.

40. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. -М.: Высшая школа. 1980. - 472 с.

41. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. - М.: Стройиздат. 1977. - 220 с.

42. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика // Избр. труды. - М.: Наука. 1979. - 334 с.

43. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. -М.: Стройиздат. 1974. - 192 с.

44. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. - Тбилиси: Мецниереба. 1979. - 230 с.

45. Дибров Г.Д. Молекулярно-поверхностные явления в дисперсных структурах, деформируемых в активных средах. Автореф. дисс. д-ра техн. наук - К.: КПИ. 1970. - 56 с.

46. Мейер, Нильсон. Новые данные по усадке бетона/II Международный конгресс по бетону в Висбадене. - М.: Госстройиздат. 1960. С. 116-139.

47. Красильников К.Г., Никитина Л.В., Скоблинская Н.Н. Физико-химия собственных деформаций цементного, камня. - М.; Стройиздат. 1980. - 256 с.

48. Берг О. Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н, Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат. 1971. - 208 с.

49. Брок Д. Основы механики разрушения. - М.: Высшая школа, 1980. - 368 с.

50. Болотин В.В. Объединенные модели разрушения и их применение к прогнозированию ресурса // Физико-химическая механика материалов - 1982 - №3. С. 3-12.

51. Коаб Р.Л., Парих Н.М. Разрушение поликристаллической механики// Разрушение. Т. 7. Ч. 1. - М.: Мир. 1976. С. 219-299.

52. Ленг Ф.Ф. Разрушение композитов с частицами в хрупкой матрице// Разрушение и усталость, композиционные материалы. Т.5. - М.: Мир. 1978. С. 11-57.

53. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. - Л.: Машиностроение. 1984. - 224 с.

54. Соломатов В.И., Аббасханов Н.А., Выровой В.Н. Бетон как композиционный материал. - Ташкент: УзНИИНТИ. 1984. - 31 с.

55. Дорофеев В.С., Выровой В.Н., Соломатов В.И. Пути снижения материалоемкости строительных материалов и конструкций. - К.: УМК ВО 1989.-79с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. ВВЕДЕНИЕ.....	8
2. ПОЛИСТРУКТУРНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	11
3. ПРОЧНОСТЬ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	17
4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОЛИСТРУКТУРНОГО СТРОЕНИЯ.....	23
4.1. Физико-механические особенности структурообразования микроструктуры композиционных строительных материалов.....	23
4.2. Механизм структурообразования композиционных строительных материалов на макроуровне.....	28
4.3. Характер распределения ВПР и технологических трещин в бетонах как полиструктурных материалах.....	40
5. МЕХАНИЗМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ.....	48
5.1. Механизм усадки образцов из композиционных строительных материалов.....	48
5.2. Влияние гетерогенности среды на распределение усадочных деформаций.....	51
6. ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕЩИН ПЕРИОД СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	56
6.1. Механизм зарождения трещин в микроструктуре КСМ.....	56
6.2. Условия роста зародышевых трещин в период организации.....	62

микроструктуры КСМ.....	62
6.3. Механизм развития трещин в микроструктуре КСМ.....	65
6.3.1. Микроструктурный механизм развития трещин в гетерогенной среде, претерпевающей объемные деформации усадки	65
6.3.2. Макроструктурные особенности развития трещин в материале, претерпевающим объемные деформации.....	68
6.4. Механизм развития технологических трещин в трещины.....	71
эксплуатации.....	71
6.4.1. Условия эксплуатации строительных конструкций.....	71
6.4.2. Механизмы развития трещин при малоцикловых	73
усталостных нагрузках.....	73
6.4.3. Влияние технологической поврежденности на усталостную .	81
стойкость микроструктуры	81
6.5. Влияние технологической поврежденности.....	88
на разрушение конструкций	88
7. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ АНАЛИЗЕ СТРУКТУРЫ	92
КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	92
КОНСТРУКЦИЙ	92
7.1. Основы системного подхода.....	92
7.2. Краткие сведения о системах различного вида	97
7.3. Композиционные строительные материалы и конструкции как сложные открытые системы	101
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	108
8.1. Декомпозиция конструкций как сложных систем.....	108
8.2. Моделирование структуры конструкции как системы.....	113
8.3. Синергетический подход при анализе конструкции как открытой системы	120

8.4. Самоорганизация материала конструкции как открытой системы	129
8.5. Принципы самосогласованной работы активных и метастабильных элементов структуры	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	145
ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
СОДЕРЖАНИЕ.....	156