

УДК 69.059.25

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н., докт. хим. наук, проф. РАХМАНОВ С. К.,  
канд. хим. наук, доц. ЩУКИН Г. Л., канд. хим. наук БЕЛАНОВИЧ А. Л.,  
асп. ПЕЛЮШКЕВИЧ А. И.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Белорусский государственный университет,  
Брестский государственный технический университет*

### Физическая модель разрушения бетона.

Современная механика разрушения рассматривает процессы разрушения на разных уровнях структуры материала с учетом пластичности, ползучести, физической и геометрической нелинейности, динамических, температурных и другого рода эффектов. Особое место в ней занимает теория хрупкого разрушения. Распространение трещины может происходить как с конечной скоростью, так и мгновенно. Если развития трещин не происходит, то работа внешних сил и внешний приток теплоты расходуется на изменение внутренней энергии тела. Если трещина развивается, то приток энергии извне расходуется также и на создание новой поверхности. Уравнение баланса энергии для тела в целом в последнем случае может быть представлено в виде

$$dU + d\Gamma = dA_F + dQ, \quad (1)$$

где  $dU$  – изменение полной внутренней энергии;  $d\Gamma$  – энергия, необходимая для образования новой поверхности;  $dA_F$  – работа внешних сил;  $dQ$  – общий внешний приток теплоты.

В соответствии с энергетическим критерием хрупкого разрушения предполагается, что трещина переходит в новое положение, если при малом изменении ее поверхности выполняется неравенство

$$\delta A_F + \delta Q - \delta U > \delta \Gamma. \quad (2)$$

Для неподвижной трещины

$$\delta A_F + \delta Q - \delta U < \delta \Gamma, \quad (3)$$

т. е. внешних притоков энергии не хватает для образования новой поверхности. В момент

страгивания трещины (локального разрушения) неравенство (3) превращается в равенство.

В силовом подходе рассматриваются условия равновесия действующих на трещину внешних (нагрузки) и внутренних сил, т. е. сил механического (межмолекулярного) сцепления. При силовом подходе объектом особого внимания является вершина трещины – место наибольшей концентрации напряжений и исходная точка дальнейшего разрушения материала. Самый общий случай полей деформаций и напряжений у вершины трещины можно получить путем комбинации трех основных типов деформаций. Тип 1 – нормальный отрыв; 2 – поперечный сдвиг, когда берега трещин скользят друг по другу; 3 – продольный сдвиг связан с антиплоской деформацией, когда берега трещины скользят друг по другу параллельно направляющему фронту трещин.

Параметр  $K_I$  носит название коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве; его значение зависит от внешних воздействий, схемы их приложения, геометрии тела, местоположения и длины трещины. Коэффициенты интенсивности напряжений для двух других основных типов трещин обозначают  $K_{II}$  и  $K_{III}$ . Тогда критерий образования (развития) трещины

$$K_I \geq K_{IC}. \quad (4)$$

Критерий (4) эквивалентен (2). Характеристика материала  $K_{IC}$  связана с его удельной поверхностной энергией зависимостью

$$K_{IC} = \frac{\sqrt{2E\gamma}}{1 - \nu^2}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – удельная поверхностная энергия материала;  $E$  – модуль упругости бетона;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Параметр  $K_{IC}$  называется критическим коэффициентом интенсивности напряжений и, как  $\gamma$ , является константой материала. Постоянство  $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$ ,  $K_{IIIC}$  обеспечивает возможность их нормирования для любого бетона.

Физическая модель бетона, предложенная Е. А. Гузеевым, К. А. Пирадовым, С. Н. Леоновичем [1–3], представлена структурой, состоящей из системы разномасштабных зерен (клинкера, песка, щебня) со связями взаимопротяжения между собой в виде активных сил  $\sum N_{act}$ , созданными физическими  $\sum N_{ph}$ , химическими  $\sum N_{ch}$  и адгезионными  $\sum N_{adh}$  процессами как результат гидратации цемента и подсистемы пустот в гидратированной массе (в виде капилляров К, пор П, трещин Т, в которых возникает комплекс реактивных сил в пределах их геометрических размеров в структуре:

$$\sum N_{react} = \sum N_K + \sum N_{II} + \sum N_T. \quad (6)$$

Физико-механические свойства в единичном объеме бетона и их изменяемые уровни обеспечиваются системой активных и подсистемой реактивных сил, создающих напряжения в структуре:

$$\sum G_i \pm \sum R_i = D_j; \quad (7)$$

$$\sum \varepsilon_i \pm \sum \varepsilon_p = E_\xi, \quad (8)$$

где  $\sum G_i$  – сумма напряжений от физико-химических процессов в активных связях;  $\sum R_i$  – то же от реактивных сил;  $D_j$  – измеряемая величина уровня прочности;  $\sum \varepsilon_i$  – сумма объемных деформаций от сил в активных связях;  $\sum \varepsilon_p$  – то же от реактивных сил;  $\varepsilon$  – измеряемый уровень деформаций в единичном объеме бетона.

С изменением давления (силы), температуры, влажности в дефектах (П, К, Т) структуры бетона, заполненных жидкостью, паром, льдом, возникают усилия, изменяющие геометрические размеры дефектов, уменьшающие (увеличивающие) количество активных связей, что влияет на уровни исходных свойств и их измеряемые величины  $D_j$  и  $\varepsilon$ .

Физическая модель кинетики разрушения бетона при несиловых воздействиях отобража-

ется в физической модели бетона через приращение (со своим знаком) в уровне напряжений от реактивных сил.

Расчетная модель разрушения строится для системы, изображенной на рис. 1, исходя из следующих ниже положений с использованием подходов механики разрушения. В зависимости от температуры и влажности капилляры, поры и трещины могут быть заполнены водой, паром или льдом, что определяет поля напряжений и смещений в их вершинах. Интенсивность напряжений, а также напряженно-деформированное состояние вблизи вершин капилляров и трещин определяются критерием трещиностойкости  $K_c = \sqrt{K_{IC}^2 + K_{IIC}^2}$  и коэффициентами интенсивности напряжений. Определяя эти величины от действия капиллярных сил, расклинивающего эффекта при нагревании воды или при замораживании и расширении льда, от давления пара на стенки капилляра или трещины, получим параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние вокруг концентраторов: пор, капилляров, трещин на любом из уровней иерархической системы (микро-, мезо- или макроуровнях).

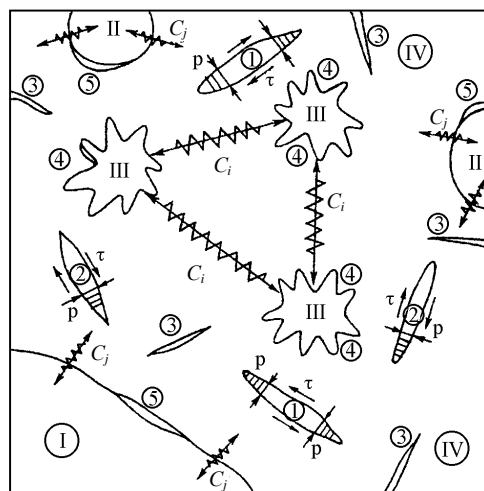


Рис. 1. Физическая модель бетона: I – зерна щебня; II – то же песка; III – то же клинкера; IV – гидратированная масса цемента; C<sub>i</sub> – физические и химические связи; C<sub>j</sub> – адгезионные контакты; 1 – капилляры, заполненные водой симметрично; 2 – то же несимметрично; 3 – микротрещины; 4 – трещины на контакте с зернами; 5 – полости контактов

Результатом процессов, происходящих в капиллярах и трещинах, являются деформации в межзерновой матрице, свободному течению

которых препятствуют жесткие зерна заполнителя или клинкера, что создает в вершинах радиальных трещин напряжения некоторой интенсивности, определяемые через коэффициент интенсивности напряжений. На контуре зерен заполнителя или клинкера возникают контактные трещины, для которых определяются значения  $K_I$  и  $K_{II}$ , зависящие, в частности, от модулей упругости зерен и межзерновой матрицы. По данным коэффициентам интенсивности напряжений определяются текущие параметры трещин и длительность периода достижения ими своих критических значений.

По известным характеристикам  $K_{IC}$  и  $K_{IIC}$  материалов зерен и межзерновой матрицы возможно получить деформативные и прочностные характеристики, а также параметры развивающихся трещин для бетона в случае изменения его влажности и температуры.

Разрушение бетона происходит не вдруг и не за одно мгновение, оно подготавливается непрерывным образованием различных дефектов структуры, их развитием в длину и ширину до критических размеров.

Прогнозирование разрушения призвано решить две задачи: 1) оценить на стадии проектирования конструкции срок ее службы по долговечности используемых материалов при задаваемых условиях эксплуатации или подобрать материалы с определенными свойствами и конструктивные решения элементов из условия заданного срока эксплуатации сооружения; 2) установить момент времени разрушения существующей конструкции, т. е. ее ресурс долговечности, либо определить вероятность разрушения в некотором временном интервале при отсутствии информации о предыстории нагружения. Адекватный прогноз долговечности конструкций связан с количественным анализом процесса разрушения, когда учитывается вклад технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов в кинетику развития микро-, мезо- и макроповреждений в структуре бетона. Такой прогноз основывается на микро- и макрофизическом описании разрушения бетона, которое в свою очередь формирует фундамент для решения следующих проблем: создание высокопрочных и высокотрещиностойких бетонов, прогнозирование разрушения работающих конструкций и проектирова-

ние бетонов из условия их заданной долговечности.

**Физико-механические основы долговечности бетона.** Сформулированы основные принципы и положения, которые определяют долговечность и механизмы разрушения бетона.

1. Все пустоты в структуре бетона могут быть рассмотрены как трещиноподобные дефекты структуры. Тогда существуют параметры  $K$ ,  $J$ ,  $\Gamma$  ( $J$  и  $\Gamma$  – инвариантные интегралы Дж. Райса и Г. Черепанова, независимые от контура интегрирования), с помощью которых может быть однозначно определено напряженно-деформированное состояние у вершин пор и трещиноподобных дефектов как при линейном, так и при нелинейном пластическом деформировании бетона. Вязкое разрушение бетона обусловлено объединением большого количества растущих в процессе формирования структуры и деформирования пустот различной конфигурации, интенсивность напряжений в вершинах которых определяется как внутривершинными и капиллярными силами, так и макродеформированием бетона или цементно-песчаной матрицы. Объем повреждений может достигать значительной величины, а нарушение сплошности и разрыхление бетона будут оказывать значительное влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции.

2. Время в сочетании с нагрузкой является главной причиной разрушения. Силовые условия разрушения не будут определяющими. Физически обоснованными и адекватными являются временной критерий или временная зависимость, описываемая формулой Журкова. Разрушение – не только механическое явление, его закономерности определяются кинетическими, статическими и термодинамическими свойствами нагруженного бетона с учетом молекулярного, надмолекулярного строения и дефектов структуры. Прочность конструкции должна быть интерпретирована как величина, ограниченная временем ее безопасной эксплуатации, в течение которого непрерывно происходит подготовка бетона к полному разрушению и нарушению сплошности за счет развития макродефектов структуры. Это делает возможным определение времени до разрушения конструкции в целом. При проектировании по

прочностным критериям рассматривают конструкцию во время ее работы под нагрузкой только в двух состояниях: исходном и разрушенном. Разрушением конструкции принято считать момент восприятия ею нагрузки, соответствующей максимальной несущей способности. Однако уже после такого мнимого «разрушения» бетонный элемент способен достаточно длительное время сопротивляться меньшему по величине внешнему воздействию. Полное разрушение на фрагменты может наступить при какой-то нагрузке – много меньшей, чем максимальная, и вследствие достижения трещинами своих критических значений. Поэтому недостаточно рассматривать только два состояния конструкции: генерация трещин протекает во времени и является кинетическим процессом. Этот процесс можно охарактеризовать как «старение» бетона, приводящее в конце концов к его разрушению, когда происходит лавинообразное неустойчивое увеличение параметров макротрещин на критической стадии трещиностойкости.

3. Напряженно-деформированное состояние конструкций зависит от повреждений в структурных элементах бетона и арматурной стали. Трещины в структуре бетона, развивающиеся по механизмам нормального отрыва и поперечного сдвига, оказывают доминирующее влияние на несущую способность сечений бетонных и железобетонных конструкций. Достигая критических размеров в процессе восприятия силовых и температурных воздействий, эти трещины приводят и к локальным нарушениям сплошности сечений, и к разрушению элемента в целом.

4. Нарастание во времени прочности бетона практически не влияет на долговечность конструкций, которую практически всегда лимитирует его понижающаяся трещиностойкость. Действительно, несмотря на довольно значительное увеличение во времени прочностных характеристик бетона, длительная прочность конструкции оказывается ниже кратковременной. Это противоречие объясняется тем, что за тот же промежуток времени показатели трещиностойкости бетона  $K_{TC}$ ,  $K_{HC}$  релаксируют, причем это уменьшение возможно определить аналитически для бетона заданного состава. В начальный период твердения бетона во время

стабилизации его структуры трещиностойкость повышается. Затем процессы деструкции начинают превалировать над стабилизационными. В вершинах пустот – пор, капилляров и дефектов структуры интенсивность напряжений достигает критических значений, и параметры трещиностойкости достигают в пределе для деформаций отрыва величины

$$K^{\text{lim}} = K_c^{\text{max}} / \sqrt{1 + 2E(1 - \nu^2)C(\infty, \tau)}. \quad (9)$$

**Общие положения прогноза долговечности.** При теоретическом обосновании метода расчета долговечности бетона с использованием подходов механики разрушения по обобщенному критерию приняты следующие допущения.

1. Бетон рассматривается как упругая квазиоднородная двухкомпонентная среда, состоящая из: а) матрицы – цементного камня со структурными элементами щебня, песка; б) пустот: капилляров-трещин и пор (полостей с начальными трещинами в стенках, имеющих размеры, на порядок превышающие размеры элементов).

2. Пустоты в матрице представлены соподчиненной пятиуровневой системой по форме и размерам, кратным диаметру, под внешними воздействиями по достижении критических размеров переходящие из уровня в следующий уровень по схеме: стабилизация размеров – деформация накопления – критическая концентрация в единичном объеме – переход на следующий уровень.

3. Процесс формирования и движения трещин рассматривается как результат внешних силовых и несиловых воздействий на основе принципов теории трещин из условия, что в вершине каждой трещины своего уровня в каноническом объеме бетона возникают поля деформаций и напряжений, создающие схемы нормального отрыва и сдвига. Возникающее состояние оценивается соответствующими затратами энергии разрушения  $G_{ij}$  и коэффициентами интенсивности напряжений  $K_{ij} = \sqrt{G_{ij} E_{ij}}$ .

4. В качестве обобщенной константы свойства трещиностойкости бетона, его сопротивления образованию, накоплению в объемах и формированию магистральных трещин критических величин принят параметр  $K_{cij}(\tau)$  как ал-

гебраическая сумма критических значений  $K_{ij}$  во всей системе всех уровней трещин-пустот, заполняющих канонический объем до критической концентрации.

5. Внешние температурные, влажностные и коррозионные длительные воздействия создают поля напряжений в вершинах пустот – трещин, оценка которых учитывается параметром  $D$  с применением положений теории старения бетона:

$$K_{ic}(\tau) = K_{ic}(\tau_0)D. \quad (10)$$

6. Процессы разрушения бетона трещинами рассматриваются как обобщенное напряженно-деформированное состояние в некотором каноническом объеме, обладающем физическими особенностями, присущими композиту с упругими и реологическими свойствами.

**Теоретические основы трещиностойкости бетона на основе обобщенного критерия.** Для вычисления полных деформаций, вызванных напряженным состоянием вокруг пустот – пор и трещин как замкнутых с симметричным или односторонним приложением внутренних сил, так и краевых незамкнутых, необходимо учесть распределение этих дефектов в цементном камне или в матрице.

Рассмотрим радиальные трещины – индекс II (рис. 2). В результате капиллярных процессов происходят некоторые деформации в гидратированной массе, свободному течению которых мешают негидратированные жесткие зерна, модуль упругости которых больше, чем модуль упругости гидратированной массы (рис. 3).

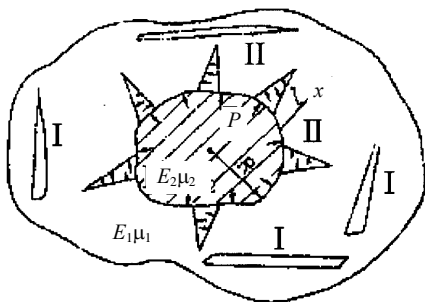


Рис. 2. Радиальные трещины в гидратированной массе

Построенная модель может быть применена и на макроуровне для цементно-песчаного раствора или бетона, т. е. модель является иерархической системой, пригодной для описания

процессов разрушения (деструкции) бетона на любых уровнях рассмотрения его структуры. Пустоты в виде капилляров на макроуровне рассматриваются как микро- и макротрещины, негидратированная масса – как зерна мелкого (цементно-песчаный раствор) или крупного (бетон) заполнителя, а гидратированная часть – как собственно цементный камень на макроуровне (цементно-песчаный раствор) или раствор (бетон).

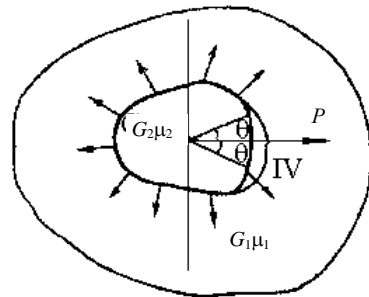


Рис. 3. Контактные трещины на границе «негидратированное зерно – гидратированная масса»

Введя соответствующие характеристики для материалов заполнителя и цементно-песчаного раствора, можно получить деформативные и прочностные параметры развивающихся трещин для бетона в случае изменения его влажности и температуры.

**Определение основных характеристик трещиностойкости бетона на любом уровне его иерархического строения.** Коэффициенты интенсивности напряжений в вершине трещиновидного дефекта в материале, структура которого содержит другие микро- и макроповреждения, отражают в своем численном значении влияние этих повреждений на напряженно-деформированное состояние как вокруг дефекта, так и всего объема материала. Учесть это суммарное влияние возможно, рассмотрев все микро- и макродефекты на всех уровнях иерархического строения композита. Каждая из пор и трещин в бетоне создает некое поле напряжений вокруг себя. Если считать, что эти поры и трещины располагаются в объеме бетона с некоторой периодичностью, поля напряжений и деформаций накладываются друг на друга, что создает сложное напряженно-деформированное состояние. Базируясь на рассмотренных выше закономерностях процесса разрушения бетона, разделим все дефекты структуры, как исход-

ные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий, на пять основных видов:

1А – округлые пустоты – поры с выходящими на их границы субмикротрещинами, образовавшимися в результате концентрации напряжений вокруг кругового отверстия;

2В – эллипсовидные пустоты – поры с выходящими на их границы микротрещинами;

3С – мезотрещиновидные дефекты в теле бетона;

4D – краевые трещиновидные дефекты;

5Е – радиальные и контактные трещины вокруг зерен и включений (типы III и IV).

Содержание пустот – пор и трещин – 1–4-го видов зависит от пористости бетона, а 5-го вида – и от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя, причем эти трещины на границе цементного камня и зерен заполнителя характеризуют мезо- и макроуровень рассмотрения структуры бетона. Объемное содержание каждого вида пустот – пор и трещин – зависит от пористости материала и объемного содержания заполнителя. Каждому виду повреждений соответствует свое значение коэффициента интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависит от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона. Применяя принцип независимости действия сил и считая, что пустоты – поры и трещины – распределены равномерно по всему объему материала, можно записать:

- для субмикро-, микро- и мезоуровней

$$K_I = n_1 K_I^1 + n_2 K_I^2 + n_3 K_I^3 + (1 - n_1 - n_2 - n_3) K_I^4, \quad (11)$$

где  $K_I^1, K_I^2, K_I^3, K_I^4$  – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в вершинах микродефектов 1-, 2-, 3- и 4-го видов;  $n_1, n_2, n_3$  – содержание микродефектов 2-го и 3-го видов в общем количестве микроповреждений;

- для мезо- и макроуровней

$$K_I = nI K_I^1 + n_2 K_I^2 + n_3 K_I^3 + n_4 K_I^4 + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) K_I^5, \quad (12)$$

где  $K_I^5$  – коэффициент интенсивности напряжений в вершинах радиальных и контактных

трещин на границе с зернами мелкого и крупного заполнителей;  $n_4$  – содержание краевых трещин в общем количестве повреждений.

Величины  $K_I^1 - K_I^5$  вычисляются в зависимости от содержания пустот – пор и трещин данного вида в общем количестве повреждений. Тогда окончательно имеем:

- для субмикро-, микро- и мезоуровней

$$K_I = p \sqrt{\pi} \{ n_1 A \sqrt{[L_1(1 + R/(R + L_1))]} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + (1 - n_1 - n_2 - n_3) D \sqrt{L_4} \}, \quad (13)$$

где  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м;  $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$  м;  $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  м;  $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$  м;  $L_4 = 5 \cdot 10^{-5}$  м;  $a = 5 \cdot 10^{-6}$  м;  $L_1 - L_4$  – полудлина (длина) дефектов или пустот – пор;  $A, B, C, D$  – коэффициенты;

- для мезо- и макроуровней

$$K_I = p \sqrt{\pi} \{ n_1 A \sqrt{[L_1(1 + R/(R + L_1))]} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + n_4 D \sqrt{L_4} + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) E \sqrt{L_5/2} \}, \quad (14)$$

где  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м;  $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$  м;  $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  м;  $L_3 = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $L_4 = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $L_5 = D_{\max}^{ag}$ ;  $a = 5 \cdot 10^{-6}$  м;  $D_{\max}^{ag}$  – максимальный диаметр зерна мелкого или крупного заполнителя в матрице или бетоне;  $L_5$  – длина радиальной трещины;  $E$  – коэффициент.

Величину  $K_{II}$  можно определить по коэффициентам  $C, D$  и  $E$ . Отметим, что сдвиговые напряжения в вершинах пустот – пор 1-го и 2-го типов не возникают. Тогда

- на субмикро-, микро- и мезоуровнях

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + (1 - n_3) K_{II}^4, \quad (15)$$

- на мезо- и макроуровнях

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + n_4 K_{II}^4 + (1 - n_3 - n_4) K_{II}^5, \quad (16)$$

где характерные размеры трещин 3–5-го видов принимаются для каждого из уровней рассмотрения в соответствии с (11) и (12).

Константу материала  $K_c$  определяем по формуле

$$K_c = \sqrt{\sum K_I^2 + \sum K_{II}^2}. \quad (17)$$

Считая, что критическая длина трещин нормального отрыва одинакова как при кратковременном, так и при длительном действии нагрузки, релаксация величины критического коэффициента интенсивности напряжений во времени запишется в виде

$$\frac{K_{IC}^b(t)}{K_{IC}^b(28)} = \left[ \frac{\sigma_{bt}(t)}{\sigma_{bt}(28)} \right] \times \frac{1}{\sqrt{E_b(t)/E_b(28) + 2E_b(t)C_b(t, 28)}}. \quad (18)$$

**Новое в технологии ремонта железобетонных конструкций.** Сущность ремонта бетонных поверхностей состоит в соединении нового цементного камня со старым, т. е. взаимного сцепления сопряженных поверхностей с образованием единого целого. Оценить количественную величину такого взаимодействия двух тел, особенно бетонов, которые подвержены после схватывания усадочным и другим видам деформаций, весьма затруднительно. Усилить же сцепление двух разных по структуре и свойствам поверхностей можно лишь увеличением площади контакта между свежим ремонтным раствором и старым бетоном или применяя другие описанные в литературе приемы [4].

К таким приемам можно отнести применение ремонтных составов с проникающим действием, обеспечивающим диффузию своих компонентов в объем старого цементного камня, взаимодействие их с составными частями защищаемого бетона и образование в порах новых соединений, которые за счет связей в зоне сцепления приводят к его уплотнению. Для реализации такого приема рекомендуется удалить с поверхности старого бетона рыхлый карбонизированный или другой по химической природе слой до открытой поровой системы цементного камня [5, 6].

Открытие поровой системы на поверхности старого бетона обеспечивает при определенных условиях, за счет диффузионных процессов, перенос компонентов нанесенного ремонтного состава с проникающим действием в капиллярную систему старого защищаемого цементного камня. Последнее достигается при наличии влаги за счет развития гетеродиффузии, представляющей собой процесс направленного пе-

реноса вещества в сторону выравнивания разности концентраций в разных участках данной фазы, или восходящей диффузии, связанной с наличием в объеме пористого твердого тела градиента внутренних напряжений [7]. В этом случае имеет место диффузионный поток из областей, где отсутствуют внутренние напряжения, в области с максимальными напряжениями. Скорость же такого переноса определяется многими факторами: пористостью бетона, формой его пор и их величиной, вязкостью среды, перепадом температур, природой переносимых частиц, воздействием различных внутренних и внешних сил и т. д.

Установлено [5], что диффузионный процесс, протекающий в объеме пористого материала, создает условия движения колющих поровое пространство компонентов покрывного материала на значительное расстояние от устья пор старого бетона. В свою очередь из объема защищаемого бетона к поверхности направляется поток водного раствора, содержащего его растворимые компоненты. Такое взаимное движение обеспечивает возможность химического взаимодействия и очагового срастания сопряженных поверхностей.

Однако следует иметь в виду, что интенсивные диффузионные и химические процессы вблизи сопряженных поверхностей бетона могут вызывать значительные усадочные напряжения в защитном слое, прилегаемом к поверхности раздела, что в сочетании с низкой прочностью защитного слоя приводит к образованию дефектов в виде микротрещин или трещин, развитие которых обеспечивает отслаивание отдельных участков защитного слоя. В случае развития такого отрицательного процесса на оголенных участках старого бетона прекращается поступление компонентов защитного состава в его капиллярную систему. При этом разница осмотического давления в устьях и истоках капилляров поровой системы бетона уменьшается и постепенно осмотическое давление стремится к нулю. Последнее приводит к прекращению поступления компонентов, находящихся в массе защитного слоя, в поры старого бетона, и постепенному вымыванию растворимых солей старого и нового бетонов [8, 9].

Использование ремонтного состава с проникающим действием, содержащим высокую концентрацию солей, способных мигрировать по порам бетона и взаимодействовать с его компонентами, вызывает значительную разницу осмотического давления раствора с гомогенными добавками в поверхностном слое и в массе защищаемого бетона. За счет этой разницы вода, содержащая меньшую концентрацию солей, движется из глубины бетона к его поверхности, а ионы солей – от поверхности в глубину защищаемого бетона. Взаимодействие химических компонентов в капиллярной системе бетона приводит к образованию в ней новых веществ, которые вместе с водой могут кольматировать поровое пространство на достаточно большом расстоянии от устья пор. Причем формирование этих веществ может происходить с увеличением объема, что будет способствовать кольматации порового пространства в массе бетона. Последнее приводит к постепенному понижению водопоглощения и водопроницаемости цементного камня.

Однако неконтролируемое образование в поровом пространстве бетона солевых отложений может также привести к негативным последствиям (образованию микротрещин и иногда – к отслаиванию ремонтного состава).

Положительные результаты по увеличению адгезии, устойчивости к изменению внешних условий и полной сохранности эффекта диффузии компонентов ремонтного состава в глубину защищаемого бетона может дать метод прерывистого снятия с поверхности старого бетона на глубину его открытой поровой системы равномерно расположенных углублений. Такая обработка поверхности старого бетона и нанесение ремонтного защищаемого слоя обеспечивают достижение определенных положительных показателей как по облегчению протекающей диффузии в ремонтной системе, так и снижению затрат на подготовку поверхности для нанесения ремонтного состава с проникающим действием.

Удаление с поверхности старого бетона, например карбонизированного слоя методом образования на ней регулярных углублений до поровой системы, приводит к тому, что образованная ячеистая поверхность имеет разную структуру. Так, в углублениях вскрывается по-

ровое пространство старого бетона, остальная поверхность покрыта другим структурным слоем.

При нанесении ремонтного состава с проникающим действием на подготовленную таким образом поверхность старого бетона компоненты его за счет диффузионных процессов легко проникают в объем старого бетона, а капиллярная влага, содержащая растворимые соединения бетона, стремится на поверхность. В объеме бетона в его капиллярной системе происходят реакции с образованием новых веществ, которые могут кольматировать поры и образовывать общий каркас с застывшим ремонтным составом. Интересно, что кольматация пор происходит радиально по всем направлениям на достаточно большое расстояние [5].

В зоне же контакта ремонтного состава с исходной поверхностью защищаемого бетона наблюдается диффузия компонентов защитного состава в верхний слой и возможно взаимодействие их с его компонентами. Такое взаимодействие, как правило, приводит к уплотнению и упрочнению верхнего слоя за счет новообразований [10].

Кроме того, развитие научных исследований диффузионных процессов, протекающих в поровом пространстве бетонов, позволит в ближайшее время решить проблему остановки коррозии металлической арматуры, находящейся в эксплуатируемых железобетонных конструкциях. Положительный эффект ингибирования процесса коррозии на поверхности арматуры достигается за счет миграции по поровому пространству бетона ингибиторов коррозии и блокировки ее очагов на поверхности металла, находящегося в бетоне [11, 12].

Таким образом, в результате происходящих процессов в поровой структуре бетона образуется система двухслойного покрытия на поверхности ремонтируемого изделия с глубоко закольматированными порами. Это двухслойное покрытие состоит из защищаемого ремонтного состава с проникающим действием и преобразованного, можно сказать упрочненного, верхнего слоя.

## ВЫВОДЫ

1. В качестве теоретической основы приняты физические представления о механизме



приращения объема пустотности в модели бетона, представленной как двухуровневая структура: матрица затвердевшего цементного камня с включениями и пустоты различной формы (трещины) как результат внешних воздействий, изменяющих напряженно-деформированное состояние.

2. Разработанная модель является иерархической системой, пригодной для описания процессов разрушения (деструкции) бетона на любых уровнях рассмотрения его структуры. Введя соответствующие характеристики для материалов заполнителя и цементно-песчаного раствора, можно получить деформативные, прочностные характеристики, параметры развивающихся трещин для бетона в случае изменения его влажности и температуры.

3. Предложено разделить все дефекты структуры, как исходные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий, на пять основных типов. Содержание пор и трещин первых четырех типов зависит от пористости бетона, а 5-го типа – и от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя. Каждому виду повреждений соответствует свой коэффициент интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависят от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона.

4. Базируясь на рассмотренных закономерностях процесса разрушения бетона, разработаны новые практические подходы к ремонту бетонных и железобетонных изделий, конструкций. Используя диффузионные процессы, протекающие в пористых материалах, можно достичь положительных эффектов при проведении ремонтных работ: значительного сокращения трудозатрат в процессе подготовки поверхности бетонного изделия перед нанесением ремонтных составов; исключения эффекта несовместимости на границе раздела защитного

слоя и защищаемого бетона; появления возможности формирования на поверхности цементного камня единого целого с ремонтным составом, что позволит обеспечивать не только кольтматацию пор, но и их ликвидацию и получить восстановленный монолитный малопористый бетон и железобетон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гузеев, Е. А.** Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест: БрПИ, 1999. – 218 с.
2. **Леонович, С. Н.** Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. – Минск: Тьдзень, 1999. – 266 с.
3. **Леонович, С. Н.** Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения / С. Н. Леонович. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2006. – 380 с.
4. **Баженов, Ю. М.** Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1987. – 415 с.
5. **General Instructions for the Penetron system.** – Jes/Penetron International Ltd. – 1993. – № 4.
6. **Ушеров-Маршак, А. В.** Кинетическая селективность влияния химических добавок на процессы твердения цемента / А. В. Ушеров-Маршак // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 35, № 12. – С. 1531–1534.
7. **Дерягин, Б. В.** Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин, Н. В. Кураев. – М.: Химия, 1984. – 101 с.
8. **Бэррер, Р.** Диффузия в твердых телах / Р. Бэррер. – М., 1948. – 420 с.
9. **Кузнецова, Т. В.** Физикохимия вяжущих материалов / Т. В. Кузнецова, И. В. Кудряшов, В. В. Тимашев. – М., 1989. – 384 с.
10. **Комахов, П. Г.** Нанотехнология, структура и свойства бетона / П. Г. Комахов // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: материалы III междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-н/Д., 2004. – С. 263–267.
11. **Gaidis James, M.** Chemistry of corrosion inhibitors / M. Gaidis James // Cement and Concrete Composites. – 2004. – № 26. – P. 181–189.
12. **Holloway, L.** Concentration monitoring and performance of a migratory corrosion inhibitor in steel-reinforced concrete / L. Holloway, K. Naim, M. Forsyth // Cement and Concrete Research. – 2004. – № 34. – P. 1435–1440.

Поступила 30.10.2007