

СТАРЕНИЕ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА И ИХ РАЗРУШЕНИЕ

*Л.И. Гречихин, Минский государственный высший авиационный колледж, Беларусь
Н.Р. Шевцов, И.В. Купенко, О.И. Рублева, Донецкий национальный технический университет, Украина*

Рассмотрены процессы «старения» и «перестарения» бетонов и железобетонов на атомно-молекулярном и кластерном уровне. Показано, что схватывание бетона обусловлено формированием плотноупакованных слоев карбоната кальция, которые определяют механические свойства бетона и железобетона. Из всех возможных внешних воздействий разогрев железобетонной конструкции прямым солнечным излучением вблизи основания способствует отслоению плотноупакованного слоя карбоната кальция от арматуры и приводит к аварии.

В строительстве, на транспорте, в энергетике, и др. эксплуатируются сложные конструкции в различных экстремальных условиях. Выход из строя только одной из множества используемых деталей в сложной конструкции может привести к серьезным аварийным ситуациям. Как предвидеть возможную поломку той или иной детали в сложной несущей строительной конструкции, – задача сложная, весьма актуальная и требует своего решения. В процессе длительной эксплуатации различные элементы строительной конструкции ведут себя по-разному. Существенно изменяются физико-механические свойства, как отдельных деталей, так и всей несущей конструкции в сложных условиях эксплуатации. Происходит процесс старения конструкционных материалов. В машиностроении достаточно подробно изучались процессы старения преимущественно композиционных металлических материалов [1-4]. В результате установлено, что старение конструкционных материалов в технике приводит к увеличению прочности, коэрцитивной силы, электросопротивления, жаропрочности и т.п. Это положительный эффект старения и обусловлен переходом однофазного состояния твердого раствора в многофазное состояние вследствие диффузии. Такая точка зрения подтверждается электронографическими исследованиями [2]. В ряде случаев положительный эффект старения сменяется на нежелательные явления: повышается хрупкость, появляется коробление деталей, т.е. возникают заметные внутренние напряжения вследствие «перестарения» [3].

Различают естественное и искусственное старение конструкционных материалов. Как в первом, так и во втором случае механизм старения не получил достаточного обоснования на уровне атомно-молекулярного взаимодействия, а поэтому не ясно, в каких случаях старение выступает как положительный эффект, а в каких – как отрицательный («перестарение»). В строительстве распространены бетонные и железобетонные конструкции, для которых термин «старение» применим, когда происходит процесс схватывания бетона, а механизм «перестарения» начинается с момента окончательной установки в несущую конструкцию.

В этой связи возникает **цель**: рассмотреть процессы «старения» и «перестарения» бетонов и железобетонов на атомно-молекулярном и кластерном уровне. Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих **задач**:

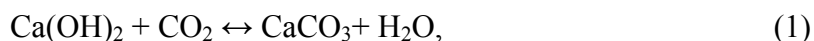
- какие механизмы взаимодействия между атомами, молекулами и кластерами формируют процесс схватывания бетона;
- рассмотреть процессы, сопровождающие структурные изменения внутри бетона и железобетона под действием механических и тепловых нагрузок;
- изучить влияние атмосферных факторов на механические свойства бетона и железобетона;
- какое влияние на механические свойства бетона и железобетона оказывают звуковые и световые воздействия.

Рассмотрим последовательно поставленные задачи.

Схватывание бетона и железобетона. Бетон и железобетон представляют собой сложный композит твердых частиц кремнезема, глинозема, гематита, магнетита и лиманита, ко-

которые связаны между собой прослойкой из молекул карбоната кальция. Такой композиционный материал обладает достаточно высокими прочностными свойствами [5, 6] и др. Как такой композиционный строительный материал формируется достаточно подробно рассмотрено в ряде работ Кучеренко А. А. [7] и др. В результате проведенных исследований было показано, что физико-механические свойства бетонов определяются межатомными связями твердеющего цементного раствора.

В процессе схватывания бетона происходят сложные реакции образования в водной среде различных твердых частиц. Процесс отвердевания бетона проходит две стадии: первая стадия – это процесс карбонизации, когда молекулы с наибольшей энергией образования $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($\Delta H^0 = 10,2$ эВ/молекулу), взаимодействуя с молекулами CO_2 в соответствии с экзотермической химической реакцией



Во второй стадии происходит упрочнение бетонной смеси вследствие образования плотноупакованных слоев карбоната кальция между частицами кремнезема, глинозема, гематита, магнетита, лиманита и различными другими примесями с вытеснением воды и ее испарением. Выделяющаяся теплота при схватывании бетона расходуется на испарение молекул воды с поверхности бетона. Динамика изменения энергий связи представлена в табл. 1.

Таблица 1

Энергия связи на одну частицу в различных агрегатных состояниях, эВ

Процесс изменения состояния	Наименование связей				
	H - O	Ca - O	Si - O	Fe - O	Al - O
Диссоциация	4,4	4,3	8,2	4,2	5,14
Образование конденсированного состояния	2,51	6,59	8,91	11,6	17,3
Структурные связи между частицами	5,02	11,82	19,3	24,6	31,5

Энергия диссоциации является энергией разрыва связи между отдельными частицами, формирующих молекулу. Эта энергия учитывается только на первой стадии замешивания бетона. В процессе протекания реакций типа (1) происходит разрыв связей между взаимодействующими молекулами и образование новых молекул. Происходит незначительное выделение энергии. Во второй стадии образуется конденсированное состояние. Энергии выделяются больше, а в процессе структурного взаимодействия различных частиц друг с другом выделяется энергия еще более значительная. В работах [5, 6] показано, что выделение энергии в этом случае происходит вследствие адгезии молекул карбоната кальция на твердых частицах кремнезема, глинозема, гематита, магнетита и лиманита, а в работе [7] и некоторых других работах Кучеренко А.А. показано, что во второй стадии проявляются наиболее сильные связи, возникающие между атомами железа и алюминия с атомом кислорода.

Чтобы понять динамику различных взаимодействий между сложными частицами в бетоне и железобетоне необходимо выяснить, как происходит процесс образования сложных молекул, как они взаимодействуют между собой, образуя кластеры, и, наконец, как взаимодействуют кластеры между собой, образуя конденсированное состояние. Рассмотрим последовательно такие процессы образования.

Образование молекул кремнезема происходит последовательно в два этапа: вначале образуется радикал SiO , а затем он взаимодействует с атомом кислорода. В двухатомной молекуле SiO валентные электроны кремния и кислорода обобщаются и оба атома образуют положительный остов. Дипольные электрические моменты положительных ионов направлены противоположно, и их разность $\Delta p_3 = 12,1 \cdot 10^{-30} - 3,882 \cdot 10^{-30} = 8,218 \cdot 10^{-30}$ Кл·м является результирующим электрическим моментом молекулы SiO .

Во втором этапе атом кислорода вступает в реакцию с радикалом SiO ($\text{SiO} + \text{O} \leftrightarrow \text{SiO}_2$). При этом образуется молекула кремнезема. Электрический дипольный момент с углом меж-

ду связями $138^\circ p_{3,рез} = 8,218 \cdot 10^{-30} + 2 \cdot 3,882 \cdot 10^{-30} \cdot \cos 69^\circ = 15,98 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Энергия ионизации 11,7 эВ. Расстояние между ядрами в молекуле является ковалентным радиусом и равен $1,51 \text{ \AA}$ [8]. Энергия разрыва связи O-SiO – 5,16 эВ, а эксперимент дает 5,66 [8]. **Образование молекулы Al_2O_3** обусловлено взаимодействием атома кислорода с двумя радикалами AlO, которые обладают дипольным электрическим моментом $P_3 = (3,882 - 0,732) \cdot 10^{-30} = 3,15 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Результирующая энергия связи частиц в молекуле Al_2O_3 определяется диполь-дипольным взаимодействием, ковалентной и ионной связью между радикалами AlO, а также взаимодействием атома кислорода с двумя радикалами AlO ковалентной и ионной связями, как это показано на рис. 1.

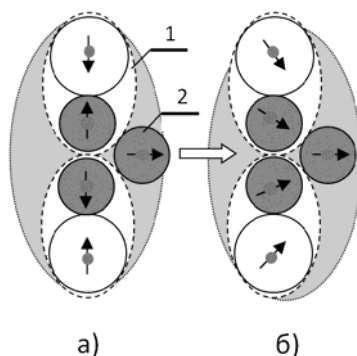


Рис. 1. Формирование молекулы Al_2O_3 :

а – исходные молекулы; б – результирующая молекула; 1 – молекула AlO; 2 – атом O

При таком расположении молекул AlO их энергия диполь-дипольного взаимодействия равна 0,0488 эВ, а ковалентная и ионная связи составляют только 0,468 эВ. Атом кислорода с двумя молекулами AlO обладает ковалентной и ионной связью 2,60 эВ, а диполь-дипольное взаимодействие дает 0,177 эВ. Следовательно, результирующая энергия образования молекулы Al_2O_3 равна примерно 2,777 эВ. Для изолированной молекулы Al_2O_3 на основании рис. 1 дипольный электрический момент составляет $8,848 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Структура молекулы Al_2O_3 определена путем нахождения минимума потенциальной энергии взаимодействия атомарных структур в указанной молекуле.

Образование молекулы карбоната кальция CaCO_3 происходит также достаточно сложно. Вначале образуются двухатомные молекулы CaO и CO, а затем эти молекулы взаимодействуют друг с другом и с атомом кислорода. При этом атом кислорода может находиться только у радикала CO, у которого имеется свободная валентная связь, и образовывать молекулу CO_2 . Поэтому в молекуле карбоната кальция молекула CaO по существу взаимодействует с молекулой CO_2 .

Атомы кислорода и кальция в молекуле CaO на расстоянии $r_e = 1,822 \text{ \AA}$ связаны между собой ковалентной и ионной связью, а также диполь-дипольным взаимодействием. Встроенный дипольный электрический момент иона атома кальция равен $28,13 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а ион атома кислорода – $3,882 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Результирующий дипольный электрический момент молекулы CaO – $24,248 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Эффективный радиус $2,293 \text{ \AA}$.

Величина результирующей энергии связи молекулы CaO $E_{рез} = 4,48$ эВ. Экспериментальное значение 4,3 эВ [8] и получено с погрешностью более 5%. Поэтому теоретическое значение в пределах допущенных ошибок измерений совпадает с данными эксперимента. Энергия ионизации молекулы CaO составляет 6,5 эВ [8].

Энергия ионизации молекулы CO_2 13,79 эВ, эффективный радиус – $1,16 \text{ \AA}$, а встроенный электрический момент $6,155 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Максимум энергии взаимодействия имеет место при последовательном расположении дипольных электрических моментов, как это показано на рис.2.

На рис.2 также показано расположение дипольных электрических моментов для каждого атома. Такому расположению дипольных электрических моментов соответствует энергии связи между молекулами CO_2 и CaO 1,14 эВ, дипольный электрический момент $p_3 = (28,13 +$

$2,273) \cdot 10^{-30} = 3,04 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а энергия ионизации – 8,64 эВ. При энергии связи 1,14 эВ молекула карбоната кальция является достаточно прочной.

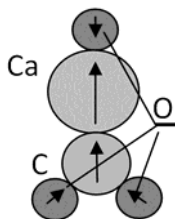


Рис. 2. Структурная схема молекулы CaCO_3

Образование кластерных структур. Сложные молекулы кремнезема, глинозема и карбоната кальция обладают большим значением дипольного электрического момента. Поэтому они в совокупности, т.е., в конденсированном состоянии образуют кристаллы простой кубической структуры ионного типа. Усредненная энергия связи одних и тех же частиц в ионном кристалле определяется по формуле:

$$E_{\text{св.,кл.}} = \frac{8p_z^2}{4\pi\epsilon_0 R_{\text{эфф}}^3} \left(-1 + \frac{0,5776}{2^{3/2}} - \frac{0,669}{3^{3/2}} + \dots \right), \quad (2)$$

где $R_{\text{эфф}}$ – эффективный радиус молекул внутри кластера.

Результаты расчета средней энергии связи частиц внутри кластера расстояния между частицами в кластере и средние дипольные электрические моменты молекул карбоната кальция, формирующих кластер, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета эффективных значений энергий бинарной связи внутри кластеров между молекулами

Параметры	Исходные молекулы		
	CaCO_3	Al_2O_3	SiO_2
R, Å	3,95...8,15	3,64...6,88	3,16
P_z , Кл·м · 10^{-30}	30,40	8,85	15,98
$E_{\text{св.,кл.}}$, эВ	1,875	0,675	3,362
$E_{\text{св.,±}}$, эВ	0,842	0,091	0,334
$E_{\text{св.,кл }}$, эВ	0,173	0,056	0,168

На основании табл. 2 можно только качественно судить, что молекулы для всех кластерных образований прочно связаны друг с другом. Распад кластеров при высоких температурах происходит вначале в горизонтальном направлении, а затем только в вертикальном относительно поверхности адгезии. Известно, что при температуре 1098 К карбонат кальция разлагается. На основании табл.2 полный разрыв минимальной бинарной связи между молекулами карбоната кальция в кластере будет происходить при расчетной температуре 2007 К в горизонтальном направлении. Получается, что в совокупности молекулы карбоната кальция будут распадаться при более высоких температурах, чем отдельная молекула. Это принципиально не только для карбоната кальция, но и для других сложных молекул. Общее построение кластеров для молекул CaCO_3 , Al_2O_3 и SiO_2 на рис. 3.

Взаимодействие между кластерами создает межкластерную решеточную структуру, которая определяет структуру и свойства конденсированного состояния. На рис. 4 приведена кластерная решеточная структура ионного кристалла. Такой кристалл пронизан в вертикальном и горизонтальном направлениях столбообразными пустотами, размер которых составляет $d = 2r_{\text{кл.}}(\sqrt{2} - 1)$. Сама поверхность ионного кристалла представляет собой периодическую электрически знакопеременную структуру. Упрочнить ее можно путем внедрения в столбообразные пустоты молекул или кластеров соответствующих размеров, обладающих сравни-

тельно большим значением дипольного электрического момента. Рельеф поверхности определяется размерами формирующих кластеров.

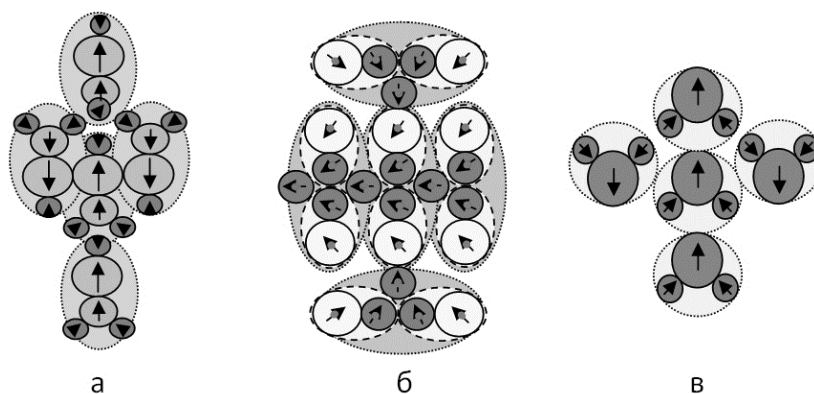


Рис. 3. Структура кластеров: а – карбоната кальция; б – глинозема; в – кремнезема

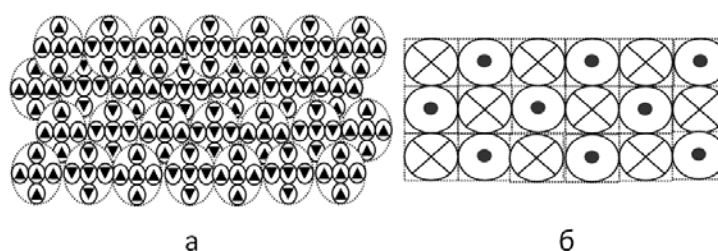


Рис. 4. Фрагмент кластерной решеточной структуры ионного кристалла: а, б – вид в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно

Кластеры карбоната кальция связаны в горизонтальном направлении в основном диполь-дипольным взаимодействием, величина которого составляет 0,270 эВ, а в вертикальном направлении они связаны энергией 0,252 эВ.

Результаты вычисления бинарной связи кластеров карбоната кальция с кластерами глинозема кремнезема сведены в табл. 3.

Таблица 3

Межкластерное расстояние, размер межкластерных пустот и энергия связи кластеров карбоната кальция с кластерной решеточной структурой кремнезема и глинозема

Тип кластера	Параметры			
	R, Å	d, Å	E _{св.} , эВ	E·10 ¹¹ , Па
SiO ₂	5,005	2,073	0,143	1,01
Al ₂ O ₃	5,245	2,172	0,259	1,61
Fe ₂ O ₃	5,525	2,284	0,254	0,65
Fe ₃ O ₄	5,547	2,298	0,369	1,89

Композиционный материал на основе кремнезема, армированного кластерами карбоната кальция, используется при замешивании бетона. В этом случае температурное разрушение бетона будет происходить на границе связи кластеров карбоната кальция с частицами песка. Температура расслоения кластеров карбоната кальция с частицами кремнезема в соответствии с их энергией связи (0,143 эВ) составляет примерно 1660 К.

Чтобы бетон обладал такими свойствами необходимо заполнить столообразные пустоты кремнезема молекулами карбоната кальция, которые внутри межкластерных пустот будут объединяться и формировать кластеры. Отдельные молекулы карбоната кальция можно получить путем распада кластера. Для этого следует использовать подогрев до температуры

1660 К. Однако он значительно усложняет технологию получения конструкционного бетона. Выход был найден в использовании водного раствора. Вода обладает большой диэлектрической проницаемостью и поэтому в воде кластеры карбоната кальция будут эффективно распадаться на отдельные молекулы уже при температуре около 14 К, а в нормальных условиях кластеры карбоната кальция в водном растворе вообще не образуются.

При заполнении столбообразных пустот молекулами карбоната кальция важно чтобы энергия связи кластеров молекул воды с той или иной основой была меньше чем связь молекул карбоната кальция с данной основой. В этом случае молекулы карбоната кальция будут вытеснять с поверхности основы кластеры воды.

Кластеры воды обладают радиусом примерно $3,42 \text{ \AA}$ и дипольным электрическим моментом $6,17 \cdot 10^{-30} \text{ Кл}\cdot\text{м}$ [8]. Связь кластера воды с молекулой карбоната кальция $0,073 \text{ эВ}$, а минимальная энергия связи между молекулами карбоната кальция $0,095 \text{ эВ}$. Поэтому по мере выпаривания воды будут образовываться кластеры карбоната кальция, и выталкивать воду на поверхность конструкционного бетона. Так протекает процесс схватывания бетона. Взаимодействие кластеров воды с кластерами всех остальных веществ составляет не более нескольких тысячных долей электроновольта. Поэтому вода не является препятствием для проникновения молекул карбоната кальция в основу кремнезема. По мере осаждения молекул карбоната кальция на той или иной основе образуются кластеры, которые должны располагаться на поверхности так, чтобы реализовалась максимальная энергия связи.

При известной энергии межкластерных связей, которая в основном определяется диполь-дипольным взаимодействием, представляется возможность определить модули Юнга для различных межкластерных взаимодействий. Модуль Юнга связан с энергией связи следующим образом [4]:

$$E = \frac{U(r) - U(r_0)}{r_0 S_{кл.} e^2}, \quad (3)$$

где $U(r)$, $U(r_0)$ – потенциалы взаимодействия соответственно на расстоянии r между взаимодействующими частицами и на равновесном удалении r_0 ;

$S_{кл.}$ – площадь кластера;

e – относительная деформация.

При использовании данных табл. 2 по энергиям взаимодействия были выполнены расчеты модулей Юнга. Результаты этих вычислений приведены в табл. 2. Для бетона модуль Юнга зависит от направления приложенной нагрузки. Обычно бетон невозможно выполнить в виде монокристалла. Поэтому для поликристаллического бетона модуль Юнга соответствует нижнему значению, приведенному в табл. 2, т.е. $6,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, а сравнить его с экспериментальными данными можно чисто качественно, так как не ясно при каких значениях деформаций были получены экспериментальные данные. Например, в [7] приводятся значения для высокопрочного бетона $4,03 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, а с фиброй $4,16 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. С данными эксперимента теоретический расчет отличается в пределах порядка величины.

Взаимодействие кластеров карбоната кальция с кластерами глинозема обуславливает более высокое значение модуля Юнга. Когда армирование бетона выполняется обычными железными стержнями, кластеры гематита или магнетита своими электрическими диполями выстраиваются хаотически относительно поверхности стержня. При расположении электрических диполей магнетита перпендикулярно поверхности кластеры карбоната кальция располагаются так, как это показано на рис. 5. Кластер карбоната кальция, взаимодействуя с такими кластерами, обладает сравнительно высокой энергией связи, но структура кластеров карбоната кальция получается не очень плотная.

При производстве арматуры происходит существенная деформация и на ее поверхности кластеры гематита или магнетита выстраиваются преимущественно вдоль поверхности. Энергия связи молекул карбоната кальция с поверхностью такой арматуры существенно возрастает. Это обусловлено тем, что электрические дипольные моменты кластеров карбоната кальция на поверхности железа располагаются последовательно друг за другом как показано на рис. 6. Кластер карбоната кальция в данном случае взаимодействует с двумя кластерами гематита

или магнетита и заполняет межкластерную пустоту. В результате диполь-дипольного взаимодействия энергия кластера карбоната кальция с основой возрастает почти в два раза. Соответственно и модуль Юнга возрастает в 1,85 раза. Аналогичная ситуация возникает, когда молекулы карбоната кальция взаимодействуют с частицами кремнезема и глинозема. Количество бетона и песка подбирается таким образом, чтобы на твердых частицах песка не образовывались кластеры карбоната кальция, а реализовалась плотноупакованная структура толщиной не более трех диаметров молекул, которая изображена на рис. 6. Такая плотноупакованная структура бетона и железобетона без ее нарушения может пребывать в напряженном состоянии бесконечно долго. Реально под воздействием внешних факторов: ударных и тепловых нагрузок ситуация резко меняется.

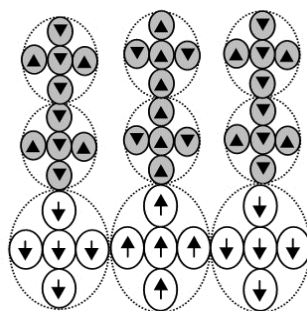


Рис. 5. Фрагмент расположения кластеров карбоната кальция на кластерах магнетита с недеформированной железной основой

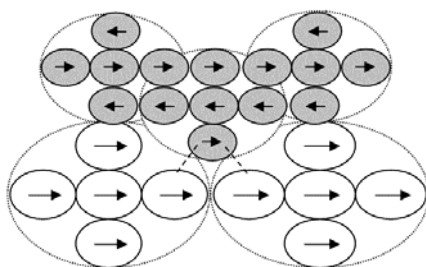


Рис. 6. Фрагмент расположения кластеров карбоната кальция между кластерами магнетита на деформированной железной основе

Структурные изменения внутри бетона и железобетона под действием механических и тепловых нагрузок. После полного схватывания бетона молекулы карбоната кальция создают плотноупакованную структуру. Такая структура приведена на рис. 7 нормально (рис. 7, а) и горизонтально (рис. 7, б) к поверхности твердых частиц, составляющих бетон или железобетон.

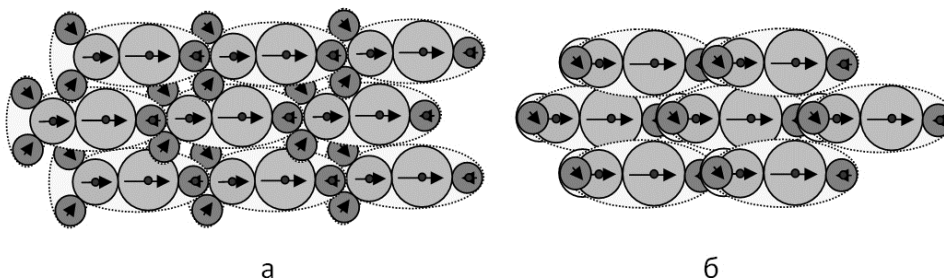


Рис. 7. Плотноупакованная структура из молекул карбоната кальция: а – вертикальное направление; б – горизонтальное направление

В плотноупакованной структуре отсутствуют пустоты. Каждая молекула карбоната кальция взаимодействует с 10-ю молекулами ближайшего окружения вдоль нормали и вдоль горизонтали относительно поверхности твердых частиц, составляющих бетон. Бинарное взаимодействие молекул карбоната кальция в плотноупакованной структуре вдоль поверхности и

нормально к поверхности обладает разной энергией взаимодействия. Учитывая принцип суперпозиции электрических полей, бинарное взаимодействие молекул карбоната кальция в плотноупакованной структуре перпендикулярно поверхности составляет 0,187 эВ, а вдоль поверхности – 0,487 эВ. Получается, что только при температуре 1896⁰ С бетон начнет распадаться, тогда как для неупорядоченной структуры карбонат кальция разлагается при температуре 825⁰ С. Температура разложения карбоната кальция определяется межкластерным взаимодействием. Энергия связи межкластерного взаимодействия соответствует температуре разложения и составляет ~ 0.0946 эВ, что почти в два раза меньше, чем для плотноупакованного состояния. Модуль Юнга при деформации $e = 0,005$ нормально к поверхности составляет $8,34 \cdot 10^{10}$ Па, а вдоль поверхности ~ $5,54 \cdot 10^{12}$ Па. Так как энергия связи между частицами в плотноупакованном состоянии обратно пропорциональна кубу расстояния, то бетонные и железобетонные конструкции слабо выдерживают ударные нагрузки. Статические нагрузки для бетонных и железобетонных конструкций не являются опасными.

Влияние атмосферных факторов на механические свойства бетона и железобетона. Воздействие атмосферы на бетонные и железобетонные конструкции осуществляется механическим воздействием ветра, колебаниями суточной и годовой температурой. Дождевые осадки и особенно кислые дожди приводят к заметной коррозии бетона. Воздействие ветра и колебания температур учитываются в процессе разработки той или ионной конструкции и поэтому не приносят особого вреда.

Дождевые осадки совместно с суточным колебанием температуры представляют некоторую опасность. Например, если в бетоне возникла трещина, то замерзлая вода в этой трещине приводит к ее развитию и в конечном итоге к разрушению бетонной конструкции. Вода на поверхности бетона не должна вступать в химическую реакцию с молекулами карбоната кальция, так как обратная реакция (1) является эндотермической и для ее реализации требуется дополнительная энергия, которая отсутствует в природных условиях. Поэтому вода бетон не разлагает.

Кислотные дожди содержат молекулы CO_2 , SO_2 и N_2O (NO). Все эти молекулы также не вступают в химическую реакцию с карбонатом кальция, являясь эндотермическими. Но если на поверхности бетонных конструкция формируются кластеры карбоната кальция, то происходит заполнение межкластерных пустот этими молекулами. Наличие в межкластерных пустотах карбоната кальция молекул CO_2 , H_2O или SO_2 при старении увеличивают энергию связи между кластерами и поэтому их присутствие на поверхности бетона приводит к улучшению механических свойств бетона.

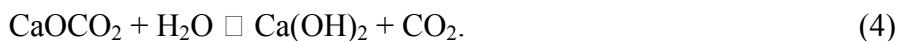
Внедрение в межкластерные пустоты карбоната кальция оксида азота приводит, наоборот, к незначительному ослаблению энергии связи между кластерами карбоната кальция. Поэтому на транспортных магистралях, бетон корродирует со временем незначительно, но достаточно заметно, где концентрация оксида азота является существенной вследствие выбросов продуктов сгорания углеводородных топлив.

Получается, что атмосферные воздействия и даже кислотные дожди весьма незначительное оказывают влияние на процесс коррозии бетона и железобетона и таким образом на заметное изменение механических свойств бетонных конструкций. При этом важно обеспечить на внешней поверхности бетона плотноупакованный слой из молекул карбоната кальция. При наличии внешних воздействий ситуация изменяется существенно.

Звуковые и световые воздействия на механические свойства бетона и железобетона. Предположим, что бетон или железобетон изготовлен с оптимальным соотношением песка и бетона (карбоната кальция). При этом толщина слоя между частицами песка и на поверхностях железной арматуры, а также на поверхности изделия не превышает трех минимальных толщин молекул карбоната кальция. В этом случае карбонат кальция пребывает в плотноупакованном состоянии. Сквозь такое состояние не может проникнуть ни одна молекула воздуха или воды, а также других молекул окружающей среды. Однако если возникает в такой среде микрощель, то возникает капиллярный эффект. Наиболее целесообразно рассмотреть капиллярный эффект в бетоне и железобетоне применительно к молекулам воды. Если

вода проникла в микрощель плотноупакованного слоя карбоната кальция, то возникнут внутренние напряжения внутри слоя. Когда подбирается наиболее оптимальное соотношение масс карбоната кальция и песка, то тогда прослойка карбоната кальция пребывает в виде плотноупакованного состояния. В этом случае реализуется наиболее прочный бетон типа М-2000. Разрушение такого бетона происходит при давлении ~ 200 МПа. Чтобы молекулы воды, обладая эффективным радиусом $1,184 \text{ \AA}$, проникли в плотноупакованную среду карбоната кальция, необходимо деформировать этот слой на величину $e = 1,184/8,15 \sim 0,145$. Такой деформации соответствует модуль Юнга $6,6 \cdot 10^9$ Па. Это на порядок выше, чем требуется для разрушения бетона. Если молекулы воды внутри плотноупакованного слоя начнут формироваться в кластеры, то тогда модуль Юнга будет соизмерим с давлением разрушения. Бетон начнет расслаиваться под действием ветровых нагрузок, под влиянием разогрева солнечным излучением, а также под воздействием звуковых колебаний, возбуждаемых внешними источниками. Очевидно, что расслоение бетона будет происходить вблизи фундамента, где почва достаточно влажная и содержит большое количество воды, которая вследствие капиллярного эффекта будет проникать с избытком внутрь плотноупакованного слоя.

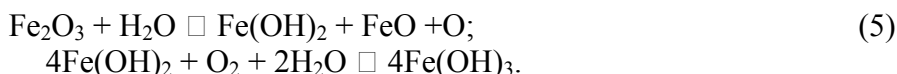
Карбонат кальция на поверхности бетона с водой образует гашеную известь Ca(OH)_2



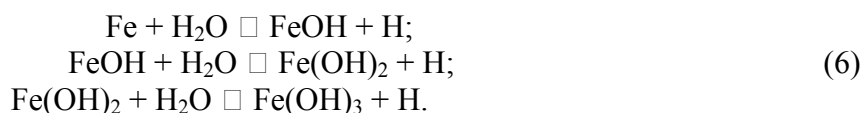
Гидроксид кальция Ca(OH)_2 образует как-бы защитную оболочку для проникновения воды внутрь плотноупакованного слоя карбоната кальция, и, взаимодействуя с углекислым газом окружающей атмосферы, вновь превращается в карбонат кальция.

Ветровая нагрузка при скорости ветра 10 м/с на объект высотой 2 м с основанием $0,5$ м составит только ~ 500 Па. Поэтому ветровые нагрузки можно не учитывать. Разогрев солнечным излучением может доходить до 50^0 С. Модуль Юнга при этом уменьшится \sim в $0,70$ раза, что составляет $\sim 30\%$ от номинала. Такое уменьшение модуля Юнга существенно не скажется на механических свойствах бетона. Звуковые нагрузки ($0-20$ кГц) следует учитывать в резонансных условиях. Колебания кластеров карбоната кальция в плотноупакованном состоянии ($100-1000$ кГц). Так как частота звука далека от частоты колебания кластеров карбоната кальция, то резонансных явлений, приводящих к разрушению бетона, не должно возникать. Поэтому непосредственно бетон, если не учитывать возможные катоклизмы природы, не должен разрушаться при воздействии внешних обычных природных явлений. В случае железобетона ситуация резко меняется.

Очевидно, что молекулы воды беспрепятственно могут проникать сквозь плотноупакованный слой карбоната кальция и доходить до арматуры железобетона. При этом возникает коррозия металла, обусловленная следующими реакциями разложения вида:



Возможны реакции и другого типа:



В результате на поверхности арматуры происходит образование гидроксида и гидратов железа, что приводит к резкому уменьшению энергии связи молекул карбоната кальция с арматурой. Так для магнетита происходит уменьшение энергии связи в два раза. Гидраты железа приводят к расслоению плотноупакованного слоя гематита и магнетита на поверхности арматуры. Возникает отслоение плотноупакованного слоя карбоната кальция от арматуры. При достаточно сильном разогреве солнечным излучением до 50^0 С модуль Юнга вдоль

поверхности арматуры составит $2,4 \cdot 10^8$ Па, а это предел, при котором происходит разрушение бетона. Если это высотная железобетонная конструкция, то со временем она должна рухнуть в южном направлении. Когда производят плановую проверку и дают разрешение на эксплуатацию высотных железобетонных конструкций, то не учитывают изменение механических свойств, вследствие коррозии арматуры. По другим показателям конструкция вполне пригодна для эксплуатации. После аварии высотных железобетонных конструкций первый признак, что происходила коррозия арматуры – это наличие оголенных прутьев арматуры в зоне разлома. В дальнейшем при выдаче разрешения на эксплуатацию высотных железобетонных конструкций следует учитывать сезонные колебания температуры, особенно в жаркие годы. Если были случаи разогрева железобетонной конструкции более 50^0 С при прямом солнечном облучении, то следует незамедлительно производить упрочнение несущей конструкции у основания.

Выводы.

Рассмотрены процессы «старения» и «перестарения» бетонов и железобетонов на атомно-молекулярном и кластерном уровне. В результате установлено:

- процесс схватывания бетона обусловлен формированием плотноупакованных слоев карбоната кальция с вытеснением воды на поверхность бетонной конструкции и ее испарение;
- сформированная плотноупакованная структура карбоната кальция преимущественно определяет механические свойства бетона (железобетона) и способна выдерживать нагрузки от $6 \cdot 10^{10}$ до $5,5 \cdot 10^{12}$ Па;
- показано, что влияние атмосферных факторов при суточном и сезонном изменениях на механические свойства бетона не оказывают существенного негативного влияния;
- наиболее сильное воздействие производит разогрев железобетонной конструкции прямым солнечным излучением вблизи основания, которое способствует заметной коррозии арматуры вследствие проникновения молекул воды по капиллярным каналам и разрушение плотноупакованных слоев гематита и магнетита с образованием гидроксида и гидратов железа, что приводит к отслоению плотноупакованного слоя карбоната кальция от арматуры и соответственно к аварии.

Список литературы

1. Гречихин Л. И. Кластерная модель старения конструкционных материалов при эксплуатации их в экстремальных условиях // Научные труды VI Международного симпозиума «Современные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева. 20 - 24 октября 2003, г. Старая Русса. В 2 т. – Т.2. Под ред. В. Г. Малинина; НовГУ им. Я. Мудрого. – Великий Новгород. 2003 г. - С. 116 - 119.
2. Гинье А. Неоднородные металлические твердые растворы. – М.: ИЛ, 1962. – 158 с.
3. Буйнов Н. Н., Захаров Р. Р. Распад металлических пересыщенных твердых растворов. – М.: Металлургия, 1964. – 143 с.
4. Гречихин Л.И. Наночастицы и нанотехнологии. – Мн.: ИООО «Право и экономика», 2008. – 406 с.
5. Подлозный Э. Д., Гречихин Л. И. Проблемы получения преднапряженного бетона на нанокластерном уровне / Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк: ЛНТУ, 2009. Вып. 25. С. 280-290
6. Гречихин Л. И., Назарчук З. Т., Скальский В. Р., Подлозный Э. Д. Упрочнение бетона плазменной обработкой поверхности / Научно-технический журнал «Строительство и реконструкция». 2011, №3(35). С. 40-50.
7. Кучеренко А. А. О получении бетона с заданными свойствами // Технологии бетонов. – 2008 - №4. С. 66-67.
8. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М., 1980. – 240 с.