

О ВЛИЯНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И КОРРОЗИИ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В БЕТОНАХ

Фалалеева Н.А., к.т.н., с.н.с., Ким Л.В., к.т.н., доц.

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Постановка задачи вызвана участвовавшими случаями появления сетки усадочных трещин на поверхности железобетонных конструкций или изделий вскоре после их разопалубливания. По мнению авторов, это вызвано применением на стройках бездобавочных высокомарочных цементов с высокой удельной поверхностью и интенсивным твердением в ранние сроки. Анализ физико-химических основ и технологических условий твердения цементов на стройплощадках выявил необходимость обязательного использования при изготовлении бетонных смесей активных минеральных добавок АМД для связывания гидрролизной извести цемента $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в низкоосновные гидросиликаты кальция НО ГСК.

Причины трещинообразования в бетонах, требования к материалам, к технологии изготовления бетонов, его защиты или ремонта относятся к числу хорошо изученных и жестко закреплены в соответствующих нормативных документах. Как правило, это нормативы двух видов: нормативы, относящиеся к проектированию бетонных и железобетонных конструкций (СНиП 2.03.01-84*, СНиП 52-01-2003 и ГОСТ 8829-94), а также нормативы, относящиеся к защите бетонов от коррозии - ТСН 52-302-2003 (МГСН 2.09-03), Пособие к МГСН 2.09-03, ГОСТ 31384-2008 и ГОСТ Р 52804-2007 (методы испытаний).

В настоящее время на стройках трещинообразование в бетонах становится уже обыденным явлением (рис. 1). Трещины появляются в опорах мостов, в панелях перекрытий, в дорожном полотне или в бордюрах и т.д., вплоть до растрескивания (пополам) цементных или бетонных образцов - кубов, оставшихся на лабораторных столах строительных или научных лабораторий (чего никогда не было два десятилетия назад).

Причин трещинообразования в бетоне много. По мнению авторов в современных условиях одной из основных причин трещинообразования в бетонах стали параметры твердения цементного камня.

Основным нормативом, определяющим требования к качеству цементов, является ГОСТ 10178-85 (СТ СЭВ 5683-86), введенный в дей-

ствии 01.01.1987 г., в период, когда бездобавочные цементы только начали применяться, а основным видом цемента были цементы с активными минеральными добавками (ПЦ-Д5 и ПЦ-Д20 М 400 и М 500) и с тонкостью помола, характеризующейся остатком на сите 008 не более 15%. Для бетонов наиболее ответственных сооружений, таких как железобетонные трубы, мостовые конструкции, стойки опор высоковольтных линий электропередач и др., использовался цемент на основе клинкера нормированного состава (с содержанием трехкальциевого алюмината C_3A не более 8 % и содержанием трехкальциевого силиката C_3S не более 50%). Назовем их «традиционными». Современные цементы соответствуют ГОСТ 10178-85, но отличаются от «традиционных» более высокой марочностью, более тонким помолом (до полного прохождения через сито 008) и ускоренным набором прочности в ранние сроки.



Рис. 1. Монолитная плита перекрытия подвала. Высолообразование и темные пятна от фильтрации воды через усадочные трещины

При использовании «традиционного» цемента в условиях сравнительно невысокой марочности цемента, в присутствии минеральных добавок и при более медленном наборе прочности бетона в ранние сроки бетонам обеспечивалась достаточная предельная растяжимость, а также создавалась возможность связывания гидролизной извести цемента в НО ГСК и уплотнения структуры при отсутствии объемных деформаций, вызванных гидратацией C_3S .

Растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при обычных температурах— 1,3 г/л. Содержание свободного гидроксида кальция, образовавшегося при гидролизе C_3S и C_2S , через 1 - 3 месяцев твердения достигает 10...15%. После снижения концентрации свободного гидроксида кальция ниже 1,1 г/л начинается разложение гидросиликатов, а затем гидроалюминатов и гидроферритов кальция.

С переходом на высокомарочные быстротвердеющие цементы с высокой тонкостью помола и интенсивным набором прочности в ранние сроки ускорились и гидратационные процессы. Ускорилось образование гидролизной извести цемента $\text{Ca}(\text{OH})_2$, не успевающей связываться в НО ГСК, но успевающей взаимодействовать с оксидами углерода, серы или азота из окружающей среды ОС с увеличением объема на +11,6; +125 и +71%, соответственно.

В бетоне кислые газы и пары растворяются в жидкой фазе, образуя кислоты и, вступая в химические реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, силикатами, алюминатами и другими соединениями цемента, нейтрализуют их с образованием соответствующих кальциевых солей [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CaCO}_3$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$], геля кремнекислоты, гидратов алюминия и железа, вызывая усадочные трещины, ухудшая деформативные характеристики и снижая способность поддерживать арматуру в пассивном состоянии, т.е. вызывая или усиливая коррозионные процессы при меньших значениях агрессивности внешней среды.

С начала 1950-60-х годов в СССР в области коррозии и защиты бетона и железобетона работали профессора В.М. Москвин (классификация коррозионных процессов), С.Н. Алексеев, В.И. Бабушкин, А. А. Байков, В.Г. Батраков, А.И. Минас, Н.А. Мощанский, В.Б. Ратинов и другие ученые. Был полностью выявлен механизм и аспекты процессов коррозионного поражения цементного камня, а весь комплекс сложных коррозионных взаимодействий был расписан на отдельные последовательно и/или параллельно протекающие простые физико-химические реакции [1-3].

Работы этих исследователей стали основой современных представлений о коррозии бетона и послужили основанием для создания действующей и сегодня нормативной документации. На взгляд авторов, именно эти коррозионные процессы и реализуются при трещинообразовании в современных бетонах. Достаточно посмотреть на соответствующие формулы коррозии.

Например, *коррозия первого вида* (процессы, возникающие в бетоне при действии жидких сред, способных растворять компоненты цементного камня). Это коррозия выщелачивания. Основная реакция –

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$, т.е. образование гидроксида кальция. В результате выщелачивания повышается пористость цементного камня.

Коррозия выщелачивания зафиксирована нами в виде белого налета на внутренней поверхности плиты перекрытия, образовавшегося при фильтрации мягкой дождевой воды на участках сквозных усадочных трещин и на вертикальных поверхностях стен подвала в зоне недоуплотнения бетона (рис. 1 и 2).



Рис. 2. Высолообразование на вертикальной поверхности стены подвала в зоне недоуплотнения бетона

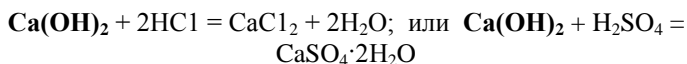
По результатам ТГА и РФА было определено, что основной фазой (90–95%) высолы (белого налета) является карбонат кальция CaCO_3 в форме кальцита, образовавшегося в результате карбонизации выщелачивающегося из цемента *гидроксида кальция*.

Остальные 5–10% высолы относятся к сульфату натрия $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Содержание гидроксида кальция (гидролизной извести цемента) снижено в приповерхностном слое бетона (в результате карбонизации). Максимальная степень карбонизации зарегистрирована на глубине 10 мм от поверхности и составляет 84%. В приповерхностном слое регистрируется дополнительный эндозэффект 110°C на ДТГ, связанный с возникновением алюмокальциевого гидрокарбоната типа $3\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, образовавшегося под воздействием CO_2 атмосферного воздуха.

Коррозия второго вида (процессы, при которых происходят химические реакции между компонентами цементного камня и агрессивной среды). К коррозии второго вида относятся кислотная, магниезильная коррозия, коррозия под влиянием некоторых органических веществ и т. п.

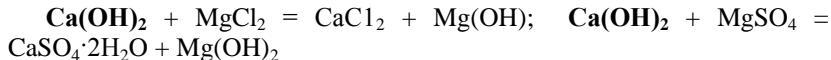
Основные реакции:

Кислотная коррозия. Кислота вступает в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция, образуя растворимые соли (например, CaCl_2) и соли, увеличивающиеся в объеме ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)



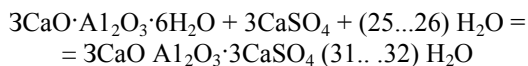
Реакции идут с образованием легкорастворимых и вымываемых водой солей, или с образованием аморфных масс, не обладающих связующими свойствами. Под действием кислот разрушаются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферриты кальция, превращаясь в кальциевые соли и аморфные массы $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_3$, $\text{Fe}_2(\text{OH})_3$.

Магниезильная коррозия. Коррозия наступает под воздействием на гидроксид кальция растворов магниезильных солей (морская вода).



Хлорид кальция и двуводный сульфат кальция хорошо растворимы в воде и вымываются из цементного камня. Гидроксид магния мало растворим в воде, но выпадает в осадок в виде рыхлой аморфной массы, которая также вымывается из бетона и т. д.

Коррозия третьего вида (с образованием соединений, занимающих больший объем, чем исходные продукты реакции). К коррозии третьего вида относится сульфатная коррозия при значительных концентрациях сульфатов в воде. Сульфаты вступают в обменную реакцию с гидроксидом кальция, образуя гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Разрушение цементного камня вызывается кристаллизационным давлением кристаллов двуводного гипса (гипсовая коррозия). В случае взаимодействия гипса с гидроалюминатом кальция возникает сульфоалюминатная коррозия.



Накопление и кристаллизация малорастворимых продуктов реакции идут с увеличением объема твердой фазы в порах бетона. Кристаллизация этих продуктов создает внутренние напряжения, которые разрушают структуру бетона. Как видно из приведенных реакций, происходящих при коррозионном разрушении бетона (цементного камня), практически в любом случае, независимо от вида коррозионного процесса, главным «аргументом в пользу» разрушения бетона является наличие несвязанного *гидроксида кальция* и последующее разрушение продуктов гидратации в цементном камне[1-3].

К технологическим причинам трещинообразования в бетонах авторы относят такие, часто повторяющиеся в условиях стройплощадок, нарушения, как:

- избыточная пластичность бетонной смеси, вызывающая несоответствие прочности при изгибе величине усадки цементного камня;

- недостаток мелких фракций в щебне (например, во Владивостоке используется только фракция щебня 5–20 мм). Для обеспечения оптимальной плотности бетона и его стойкости к деформациям в составе бетонной смеси должна присутствовать фракция щебня 5-10 мм в количестве не менее 30 - 40 % от массы щебня;

- лещадность. В соответствии со СНиП 3.03.01-87 для тонкостенных конструкций при перекачивании бетонной смеси бетононасосом содержание зерен пластинчатой и игловатой форм должно быть не более 15% по массе. Фактически же количество лещадных зерен в щебне и количество песка крупностью менее 0,3 мм, как правило, превышают допустимые значения;

- перерасход цемента. В связи с необходимостью снижения экзотермии бетонов, влияющей на термическую трещиностойкость бетона, расход цемента обычно минимизируют. Например, при расходе цемента 360...380 кг/м³ температура бетонной смеси за счет внутреннего тепла может достигать 40–50°С, и термические напряжения приводят к образованию трещин;

- коррозия арматуры.

Таким образом, высокомарочные цементы нуждаются в обязательном дополнении небольшими дозировками АМД для снятия термических напряжений и повышения трещиностойкости бетонов. Усадка, саморазогрев, коррозия выщелачивания, процессы карбонатизации или сульфатизации цементного камня в бетоне связаны с отсутствием полноценного связывания гидролизной извести цемента в низкоосновные гидросиликаты кальция НО ГСК, уплотняющие его структуру и повышающие общую коррозионную стойкость бетона, а все названные фак-

торы в конечном счете скажутся на морозостойкости, сульфатостойкости и общей долговечности бетонов.

НИИЖБ (пособие к МГСН 2.09-03) для обеспечения коррозионной стойкости и долговечности бетонов рекомендовал к применению цементы (вяжущие) низкой водопотребности ЦНВ (ВНВ) с содержанием минеральных добавок не более 10-15%, цементы в сочетании с добавками органо-минеральных композиций серии «МБ» и «ЭМБЭЛИТ», добавки напрягающих или безусадочных цементов и другие цементосодержащие вяжущие. Основное условие – наличие данных по обеспечению коррозионной стойкости и морозостойкости бетона на указанных вяжущих и стойкости арматуры в этих бетонах.

Заключение

Авторы считают, что небольшие дозировки микрокремнезема МК или тонкомолотого гранулированного шлака ГДШ не снизят позитивных характеристик высокомарочных цементов. Механизмы их воздействия на гидратацию цемента обоснованы детальными научными работками, проверены многолетней практикой и практически не нуждаются в дополнительных испытаниях.

Отсюда, наша рекомендация: при приготовлении бетонных смесей на бетоносмесительных узлах для городского строительства рекомендуется обязательно вводить добавки МК, ДГШ или других АМД в количествах 6-10% от массы цемента (т.е. в дозировках, нормированных для МК в цементе СЕМ II/A-D международным стандартом EN 197-1, или как это принято в зарубежной практике).

Summary

The analysis of physical and chemical principles and technological conditions of hardening cement on construction sites is presented. Necessary conditions for improving fracture toughness of concrete in modern HP concretes are discussed.

Литература

1. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. Москва. Стройиздат, 1976.
2. Москвин В.М. Коррозия бетона. - М.: Госстройиздат, 1952.
3. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С. и др. Долговечность железобетона в агрессивных средах. - М: Госстройиздат, 1990.