

УДК 691.5

Никишкин В. А, канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник
ОАО институт «УралНИИАС»,
г. Екатеринбург, Россия

МИКРОСТРУКТУРА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

Цементный камень, входящий в структуру бетона, является капиллярно-пористым телом. В результате сквозь капилляры и поры может просачиваться вода, причем фильтрация воды идет тем интенсивней, чем большее давление оказывается водой на бетон. Кроме того, фильтрация воды может осуществляться через микрополости в местах контакта цементного камня с заполнителем [1]. Считается, что через тонкие капилляры сечением менее 1 мк вода не фильтруется даже под большим давлением [2].

Одним из способов повышения водонепроницаемости является введение специальных добавок в бетон на стадии его изготовления, и хотя логично предположить, что понижение водонепроницаемости происходит в этом случае за счет уменьшения количества и диаметра капилляров и толщины полостей в бетоне, механизм действия добавки в основном остается закрытым для исследователей, а эффективность добавки определяется эмпирическим методом. Заполнение капилляров, пор и полостей может происходить в результате следующих процессов:

- 1 – добавка обладает пластифицирующими свойствами и при ее использовании снижается водоцементное отношение, в результате цементный камень получается более плотным;
- 2 – примененная добавка действует как катализатор и ускоряет гидратацию частиц цемента с образованием большего объема продуктов гидратации, которые имеют более низкую плотность по сравнению с исходным веществом, занимают больший объем, заполняя пустоты;
- 3 – добавка, взаимодействуя с водой и с компонентами бетона, сама создает избыточный объем нового вещества и т.д.

Изменения капиллярности цементного камня сопровождается изменением его внутренней структуры. Одним из методов оценки изменений, происходящих в структуре, является визуальный метод. Применение электронной микроскопии позволяет человеческому глазу заглянуть в микромир.

Для визуального анализа влияния добавок на структуру цементного камня были использованы фотографии, выполненные на растровом электронном микроскопе в РФЯЦ-НИИТФ (г. Снежинск). Часть фотографических снимков сделана при исследовании бетона без добавок, другая часть при исследовании бетона с добавкой «Пенетрон Адмикс». Состав бетонов приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Составы исследуемых бетонов

Состав бетона	Мелкозернистый бетон	Мелкозернистый бетон с добавкой «Пенетрон Адмикс»*
Цемент ПЦ500 Д0 Невьянский цементный завод, кг/м ³	500	500
Щебень (фр. 5 мм)**, кг/м ³	500	500
Песок**, кг/м ³	1000	1000
Вода, л/м ³	400	400

Примечание:

* - Количество добавки «Пенетрон Адмикс» составляет 1% от веса цемента;

** - Щебень и песок с Монетного гранитного карьера (Свердловская область).

На рис. 1 представлена структура бетону, полученного без использования добавок, а на рис. 2 - структура бетона, при приготовлении которого использовалась добавка «Пенетрон Адмикс», предназначенная для получения бетонов с повышенной водонепроницаемостью.

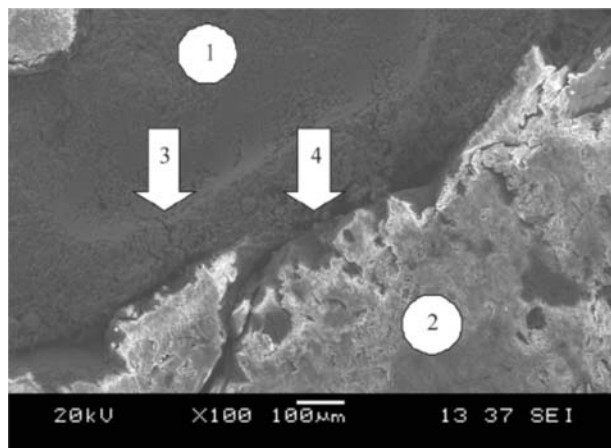


Рисунок 1 - Образование полостей между заполнителем и цементным камнем в образцах мелкозернистого бетона

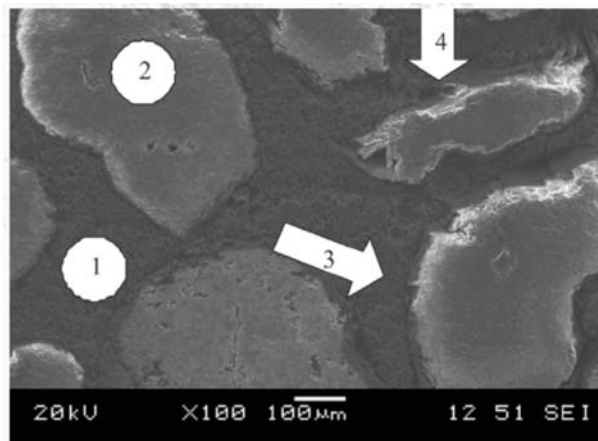


Рисунок 2 - Заполнение полостей между заполнителем и цементным камнем новообразованиями для мелкозернистого бетона с добавкой «Пенетрон Адмикс». Возраст исследуемого бетона 56 суток

На рис. 1 поз. 1 обозначает цементный камень, поз. 2 – зерна заполнителя. Цементный камень содержит множество пор и капилляров, которые хорошо видны. Присутствуют поры и в заполнителе. Стрелкой 3 отмечена усадочная трещина в цементном камне, которая по ширине раскрытия примерно равна среднему диаметру капилляров или 3,5-4,5 мкм. Шаг расположения усадочных трещин от 200 до 400 мкм. Такие трещины визуальным глазом неразличимы на поверхности железобетонных и бетонных изделий. Видимыми они становятся при ширине раскрытия 0,05 мм или 50 мкм. Стрелкой 4 выделена полость, образовавшаяся в области пограничной по отношению к разделу «заполнитель - цементный камень». Полость имеет оплывшие края, неравномерную ширину раскрытия по длине от 10 до 35 мкм. Полость образуется по поверхности, огибающей поверхность заполнителя, это хорошо видно на рис. 2 поз. 3. Непосредственного выхода поверхности заполнителя в полость нет, так как его поверхность покрыта тонким слоем цементного камня, который сглаживает острые углы и грани частиц заполнителя, полученные дроблением, приближая зерно заполнителя по форме к идеальному шарообразному. Полученные фотографии с хорошо видимой полостью вокруг зерна заполнителя подтверждают правильность теоретических выводов о возможности поворота зерна заполнителя при возникновении в бетоне сжимающих напряжений, необходимости представлять при расчетах прочности фактическое зерно заполнителя неправильной формы зерном заполнителя сферическим эквивалентным [3]. Оплывшие, округлые края полости поз. 3 рис. 1 и поз. 4 рис. 2 говорят о том, что полость формируется в момент близкий к концу схватывания цементного теста, когда цементный камень еще может деформироваться пластично. Усадочные трещины края острые, они образуются в уже затвердевшем бетоне. Ширина раскрытия усадочных трещин линейно зависит от длины трещины.

На рис. 2 поз. 1 обозначает цементный камень, поз. 2 – заполнитель. На рис. 2 усадочные трещины аналогичны трещинам, образовавшимся в бетоне без добавок, и расположены в местах наибольшего сближения зерен заполнителя в направлении от одного зерна заполнителя к другому. Как уже указывалось, на фильтрационную способность бетона значительное влияние оказывают микрополости в местах контакта цементного камня с заполнителем [1]. На рис. 2 стрелкой 4

отмечено образование в такой полости щетки игловидных кристаллов. Они по своей форме похожи на игловидные кристаллы гидросиликата кальция. Такие игольчатые кристаллы в составе геля гидросиликата кальция достигают длины более 1мм, образуя связанные, но рыхлые структуры между зернами [4]. Размер полости с шириной раскрытия по длине от 10 до 35 мкм, сформировавшейся в процессе схватывания цементного камня, вполне достаточен для сохранения образовавшихся кристаллов, тем более что формируются они после образования полости вокруг заполнителя. Наличие кристаллических гидросиликатов кальция в полости вокруг заполнителя сужает ширину полости, а местами может и перекрывать ее, что положительно повлияет на водонепроницаемость бетона. Добавка «Пенетрон Адмикс» в данном случае, как видно из рис. 2, способствует образованию кристаллов, подобных по форме и размеру кристаллам гидросиликата кальция, повышая водонепроницаемость бетона.

На рис. 3 при увеличении 5000 раз есть возможность оценить цементный камень, сформировавшийся без использования специальных добавок, на уровне отдельных частиц цемента, которые по поперечному размеру находятся в основном в пределах от 5 до 40 мкм. Мы видим, что частицы цемента разделены трещинами (поз. 1), причем более мелкие частицы, в данном случае это частица размером в 5 мкм (поз. 2), внедряются в более крупные частицы, обеспечивая их сцепление. Влияние такого рода взаимодействий частиц цемента на прочность цементного камня и бетона описана в [3]. По наружной поверхности частицы цемента покрыты слоями новообразований, возникших в результате гидратации (поз. 3). Новообразования расположены слоями по поверхности цементных частиц, а слои в свою очередь сформированы из отдельных полупрозрачных фольгообразных пластинок, чешуек с неровными изъеденными краями. Размер чешуек от 0,12 до 0,25 мкм. Они могут формировать пластинки большего размера, соединяясь по краям между собой до размера 2-3 мк. В небольшом количестве видны шестиугольные пластинки с размером 1,5-3 мк (например: между стрелками 1 и 2). Известно, что пластинки тоберморита могут иметь размер около 0,12 мкм, а трехкальциевый гидроалюминат кристаллизуется в виде шестиугольных пластинок [5].

На рис. 4 показан цементный камень после гидратации при использовании добавки «Пенетрон Адмикс», при увеличении, позволяющем оценить структуру на уровне частиц цемента. Ширина раскрытия полости между цементными зернами (поз. 1) в соответствии с этим рисунком достигает 5-7 мкм. Поверхность цементных зерен также покрыта слоями из пластинок и чешуек из новообразований, основу которых составляет тоберморит, но изменились их внешний вид, размеры, направление фиксации. Добавка «Пенетрон Адмикс» привела к тому, что укрупнились размеры пластинок до 3,5 – 7 мкм, что в 2 – 15 раз больше, чем в цементном камне без использования добавки. Уже не все пластинки располагаются параллельными слоями (поз. 2), часть пластинок расположена веерообразно (поз. 3). Увеличилось и расстояние между пластинками. Так как в совокупности рассматриваемая масса пластинок и чешуек представляет собой тоберморитовый гель, то можно сказать, что объём тоберморитового геля в цементном камне, представленном на рис. 4, при одном и том же количестве твёрдого вещества в геле, будет значительно больше, чем объём геля в цементном камне, представленном на рис. 3. Распушённый добавкой тоберморитовый гель, заполняя пространство между гидратированными цементными частицами, будет уменьшать свободное пространство между ними, создавать свою собственную систему каналов и капилляров взамен широких полостей между частицами и в усадочных трещинах. Вновь созданная система каналов и капилляров будет иметь размеры полостей для проникновения воды значительно меньшие, увеличит количество пор и капилляров с диаметром менее 1 мкм, что придаст бетону большую водонепроницаемость. Часть новообразований кристаллизуется в виде игл (поз. 4 рис. 4). Стрелкой 5 на рис. 4 показана трещина, отделяющая зерно цемента, покрытое продуктами гидратации, от других зерен. Ширина раскрытия трещины в данном случае равна 0,1-0,15 мкм.

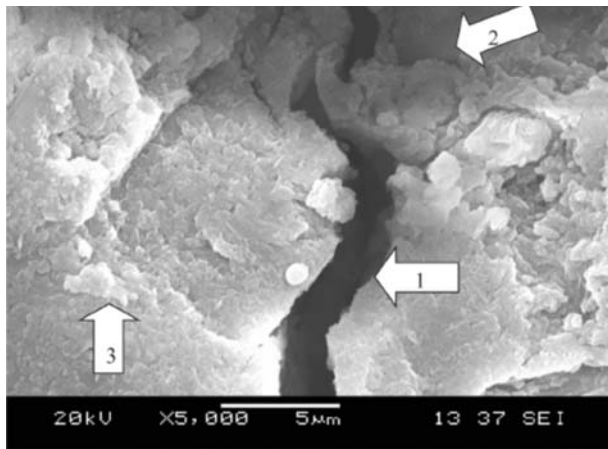


Рисунок 3 - Полости между частицами цемента и пластинчатые новообразования на частицах цемента в образцах мелкозернистого бетона

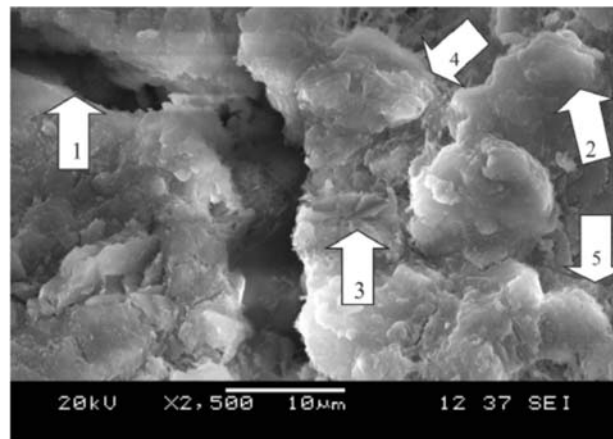


Рисунок 4 - Полости между частицами цемента и пластинчатые новообразования на частицах цемента для мелкозернистого бетона с добавкой «Пенетрон Адмикс»

На рис. 5 показан цементный камень при увеличении в 10000 раз. Видна трещина (поз. 1) с шириной раскрытия 2 мкм и более мелкие трещины с шириной раскрытия до 0,1 мкм. Трещина с раскрытием 2 мкм проницаема для воды и свободна от новообразований. Стрелка поз. 2 указывает на участок цементного камня, сформированный из слоистого тоберморита. Стрелка поз. 3 – на торцы волокнистых структур, а стрелка поз. 4 – на вид тех же структур сбоку. Волокнистые структуры могут быть образованы из трубчатых тоберморитов или гидроалюминатов кальция. Длина волокон до 0,6-0,8 мкм, а диаметр до 0,12-0,14 мкм.

Сравнивая рис. 6 с рис. 5, можно отметить: трещина (поз. 3 на рис. 6) между частицами (поз. 1 на рис. 6) цемента имеет ширину примерно равную 2 мкм и на 80-85% заполнена новообразованиями, появившимися после гидратации минералов с поверхности цементных зерен. Одна часть этих новообразований, возможно, представлена иглами гидросиликата кальция, (поз. 2), другая часть представлена волокнами тоберморита. И хотя масса этих новообразований обладает высокой пористостью, они своим присутствием уменьшают свободный просвет трещины, значительно снижая её водопроницаемость, повышая в конечном итоге водонепроницаемость бетона.

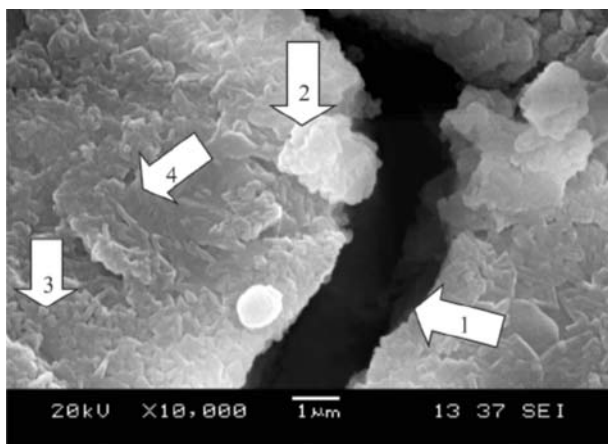


Рисунок 5 - Полости между частицами цемента и пластинчатые новообразования на частицах цемента в образцах мелкозернистого бетона

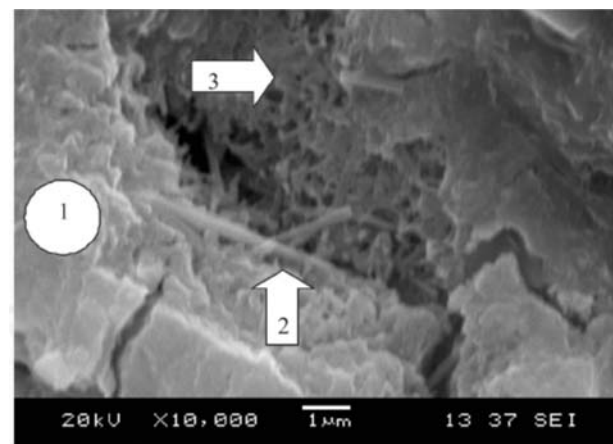


Рисунок 6 - Полости между частицами цемента, заполненные игольчатыми новообразованиями для мелкозернистого бетона с добавкой «Пенетрон Адмикс»

Основные выводы:

1. Бетон и цементный камень пронизан большим количеством трещин и полостей, которые образуются не только у поверхности заполнителя, но и между цементными зернами. Тем не менее, они способны надежно работать, воспринимая силовые и иные нагрузки.

2. Полости у границы «заполнитель-цементный камень» образуются в конце схватывания цементного теста в результате его контракции при переходе от пластичного состояния в твердое.

3. Трещины между частицами цемента могут образовываться в результате усадки цементного камня; в этом случае они имеют вид условных прямых полостей, и в результате неплотного сближения цементных частиц, если продуктов гидратации недостаточно, чтобы их заполнить, трещины имеют вид ломаных.

4. В цементном камне обычного состава без добавок продукты гидратации в виде пластинок, чешуек, волокон, иглообразных кристаллов имеют небольшие размеры, располагаются на поверхности цементных зерен, где плотно укладываются в слоистые структуры, практически не влияя на степень заполнения трещин между зёрнами цемента.

5. Добавка «Пенетрон Адмикс» изменяет структуру тоберморитового геля, способствует увеличению сечения пластинок, которые его формируют, увеличивает расстояние между пластинками, изменяет направление развития соседних пластинок, заставляя их раскрываться веером. Кроме того, создаются условия для кристаллизации гидросиликата кальция в виде щеток игловидных кристаллов, заполняющих полости между зёрнами. В результате при одной и той же массе тоберморитового геля при использовании добавки «Пенетрон Адмикс» объём геля вырастает по сравнению с гелем цементного камня, твердевшего без добавки. Гель получается более рыхлой структуры, заполняет трещины между цементными зёрнами, уменьшая поперечный размер щелей, пор, капилляров цементного камня. Водонепроницаемость бетона увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1971 – 360 с.
2. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. – М.: Энергия, 1968 – 192 с.
3. Никишкин В.А. Влияние структуры и плотности на прочность и деформативность плотного строительного бетона и его составляющих. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2009. – 269 с.
4. Мори Х., Судо Г., Минэгиси К., Ота Т. Некоторые свойства С-S-H-геля, полученного путем гидратации С3Н в присутствии щелочи/ Шестой международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. - С. 223-227.
5. Грудено А. Микроструктура твердеющего цементного теста/ Четвертый международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964. - С. 459-469.