

Анализ экспериментально полученных значений самонапряжения бетонного ядра сталетрубобетонных элементов свидетельствует о равенстве тангенциальных и осевых напряжений (разница между средними напряжениями по двум направлениям не превышает 9 %). Таким образом, бетонное ядро самонапряженных сталетрубобетонных элементов находится в условиях равномерного объемного сжатия.

Марка напрягающего бетона, использованного для изготовления опытных образцов, по самонапряжению, определенная в условиях одноосного стандартного ограничения (1 %), но при хранении в изолированных условиях (моделирующих условия твердения бетона в трубе), составила  $\sigma_{CE} = 2,0$  МПа. Определив марку, был выполнен расчёт самонапряжения бетонного ядра по мультипликативной зависимости В. В. Михайлова и С. Л. Литвера, представленной в Пособии по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций к СНиП 2.03.01-84. Для элементов с толщиной стенки оболочки 1; 1,5; 2 мм самонапряжение бетонного ядра соответственно составило 3,3; 3,4; 3,5 МПа.

Таким образом, значения самонапряжения, рассчитанные по мультипликативной зависимости, значительно занижены в сравнении с экспериментально полученными значениями самонапряжения бетонного ядра сталетрубобетонных элементов. Следует также отметить, что ряд конструктивно-технологических коэффициентов мультипликативной зависимости трудно применимы к трубобетонным конструкциям.

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют об эффективности применения комплексной расширяющейся добавки для получения самонапряженных сталетрубобетонных элементов. При этом возможно получать необходимую величину самонапряжения, варьируя количественный состав напрягающего цемента и его расход.

Применение комплексной расширяющейся добавки позволило решить основную проблему использования классических напрягающих бетонов в трубобетоне – рост собственных деформаций в условиях изоляции без доступа дополнительной влаги, необходимой для перекристаллизации моносульфата в этtringит.

УДК 691.332

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. А. ВАСИЛЬЕВ

*Белорусский государственный университет транспорта*

Карбонизация бетона является самым распространенным видом коррозии бетона. В настоящее время оценку и прогнозирование карбонизации осуществляют по изменению толщины нейтрализованного слоя бетона. Ее определяют с помощью 0,1%-ного спиртового раствора фенолфталеина (индикаторным тестом). При этом считается, что бетон в неокрашенной зоне нейтрализован и потерял свои защитные свойства по отношению к арматуре, а в окрашенной – находится в удовлетворительном состоянии. На основании лабораторных исследований принято, что карбонизация развивается фронтально с поверхности в глубь бетона. При этом поглощение углекислого газа в капиллярах некарбонизированного влажного бетона происходит в узкой зоне, глубина которой не превышает 1 мм. Также процесс карбонизации рассматривается как конечный во времени и по сечению конструкции.

В соответствии с общепринятым представлением механизм карбонизации включает в себя: диффузию  $\text{CO}_2$  в порах и капиллярах бетона, заполненных воздухом; растворение  $\text{CO}_2$  в жидкой фазе бетона, образование угольной кислоты, ее диссоциация на ионы водорода, бикарбонат- и карбонат-ионы; диффузию образовавшихся ионов в жидкой фазе; растворение  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , его диссоциацию и диффузию ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ ; химическое взаимодействие углекислоты с растворенным гидратом окиси кальция с образованием бикарбоната и карбоната кальция; кристаллизацию карбоната кальция. Контролирующим процессом считается диффузия  $\text{CO}_2$  в глубь бетона. При этом поглощение углекислого газа в капиллярах некарбонизированного влажного бетона происходит в узкой зоне, глубина которой не превышает 1 мм.

Многолетние авторские исследования эксплуатируемых железобетонных конструкций (ЖБК) по глубине полностью опровергают такие представления. Они показывают, что карбонизация бетона продолжается все время эксплуатации конструкций. Она развивается с поверхностных слоев в глубь бетона не фронтально, а по экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях). В лабораторных условиях выявлено, что на границе перехода неокрашенной зоны бетона в окрашенную показатель вытяжки поровой жидкости бетона –  $\text{pH} \approx 10$ , а в соответствии с исследованиями В. И. Бабушкина коррозия

арматуры возможна при  $pH \leq 11,8$ . При оценке степени карбонизации в реально эксплуатируемых конструкциях значения толщины слоя, в котором он потерял защитные свойства по отношению к арматуре, определенные индикаторным тестом (при  $pH = 10$ ) и физико-химическим методом (при  $pH = 11,8$ ), отличаются до пяти(!) раз, а коррозионные процессы различной интенсивности в арматуре присутствуют в зоне, в которой по индикаторному тесту бетон сохраняет свои защитные свойства по отношению к арматуре. Кроме того, большой разброс данных при определении толщины нейтрализованного слоя, связанный с неоднородным строением, различными пористостью и плотностью бетона, не позволяет выполнять с достаточной точностью оценку глубины карбонизации бетона даже по существующим методикам.

Индикаторный метод не позволяет количественно оценивать показатель  $pH$  в зоне расположения арматуры, детально судить о его изменении в нейтрализованной зоне и за ее пределами и, как следствие, — о состоянии защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Таким образом, его применение для оценки карбонизации бетона не дает возможности достоверно оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре, а поскольку существующие методики оценки и прогнозирования карбонизации бетона основаны на фенолфталеиновом тесте, то несмотря на их постоянное усовершенствование, применение данных методик не позволяет объективно оценивать и прогнозировать процессы карбонизации.

Существующий механизм карбонизации не подтверждается экспериментальными и натурными исследованиями. Методы оценки и прогнозирования карбонизации бетона, основанные на использовании фенолфталеинового теста не позволяют с необходимой степенью достоверности определять толщину карбонизированного слоя бетона, прогнозировать развитие карбонизации во времени и как, следствие, оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБК и их долговечность.

На основе исследования кинетики взаимодействия растворов  $Ca(OH)_2$  различных концентраций с  $CO_2$  воздуха методами  $pH$ -метрии, карбометрии и микроскопического анализа, исследования кинетики испарения влаги, адсорбции и десорбции паров воды образцами бетона различных классов по прочности методом измерения электросопротивления, а также изучения карбонизации реально эксплуатируемых бетонных и железобетонных конструкций автором предложен иной механизм карбонизации. В соответствии с ним процесс карбонизации относится к гетерогенной химической реакции и характеризуется сложностью и многостадийностью. Многостадийность состоит: из диффузионного подвода к поверхности раздела фаз реагирующих веществ  $CO_2$  и  $Ca(OH)_2$ ; химической реакции; возникновения и роста кристаллов карбоната кальция без отвода продуктов реакции из тонкого слоя жидкой фазы. В начальной стадии развития карбонизации кинетика процесса контролируется диффузией  $Ca(OH)_2$  поровой влаги и изменением площади твердой фазы, которые взаимосвязаны между собой. В последующем скорость карбонизации будет зависеть от пористости материала и частоты смены увлажнения и высыхания поровой влаги, т. е. будет носить периодический характер; процесс карбонизации в поровом пространстве рассматривается по аналогии с действием гидравлического насоса, в котором изменение температуры и влажности способствует смене уровня поровой жидкости, служащей поршнем гидравлического насоса в газовой среде поры. Чем чаще происходят перепады температуры и меняется влажность, тем выше скорость карбонизации (особенно в поверхностных слоях) из-за более эффективной работы гидравлических насосов, обеспечивающих подсос воздуха в поры.

Предлагаемый механизм карбонизации, основанный на экспериментальных результатах, позволяет объяснить течение процесса карбонизации по сечению конструкций во времени в зависимости от условий эксплуатации. Он подтверждается лабораторными и натурными исследованиями реально эксплуатирующихся бетонных и железобетонных конструкций.

УДК 624.01.04

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ «HELIBEAM» ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*А. А. ВАСИЛЬЕВ, С. В. ДЗИРКО*

*Белорусский государственный университет транспорта*

Необходимость выполнения работ по усилению строительных конструкций с высоким качеством и минимальными затратами, высокотехнологично, а также обеспечения нужной долговечности материалов и конструкций в целом требует применения новых высокоэффективных решений. Одним из современных вариантов восстановления конструкций является применение технологии дополнительного армирования конструк-