

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ БЕТОНА

Дорофеев В.С., Бреднёв А.М. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

**Приводятся сведения о состоянии вопроса исследования технологической поврежденности бетона и ее влиянии на физико-механические свойства бетона и изделий на его основе**

Железобетонные изгибаемые элементы являются одними из основных в составе систем зданий и сооружений, поэтому дальнейшее детальное изучение их работы при действии статических и малоцикловых нагрузок является достаточно актуальной задачей в настоящее время. Особый интерес вызывает работа технологически поврежденных балок при действии малоцикловых нагрузок, наиболее часто встречающихся в процессе эксплуатации. Эксплуатационные нагрузки, действующие на конструкцию, вызывают в ней деформации и напряжения, которые материал воспринимает и перераспределяет между собственными структурными элементами. Несущая способность конструкции определяется способностью материала продолжать выполнять свои функции в новых условиях [1, 2].

Анализ многолетних исследований и практических наблюдений показывает, что бетон представляет собой сложную ограниченно самоорганизующуюся систему и является активным объектом влияния внешней среды. Долговечность бетона конструкций - это способность бетона сохранять эксплуатационные качества конструкции в течение требуемого периода, например, 50 лет и больше.

Известно, что бетон, в силу своей неоднородности и особенностей формирования структуры, является технологически поврежденным материалом, т.е. в конструкциях из него присутствуют технологические трещины еще до приложения к ним эксплуатационных нагрузок. Установлено, что количество начальных трещин в теле бетона зависит как от качественного и количественного составов, так и от условий технологической переработки материала в изделие [2, 6, 7]. Под действием напряжений растяжения в некоторой наиболее удобно расположенной плоскости происходит сдвиг. Сдвиг в обратном направлении (изменение знака напряжений) идет по параллельной плоскости.

При этом возможны выдавливание или экструзия либо вдавливание или интрузия поверхности достаточно изотропного и упругого материала. При переменных напряжениях вдавливание представляет собой зародышевую трещину, способную расти до тех пор, пока не достигнет длины, при которой определяющим условием дальнейшего роста становятся напряжения у её вершины. Предполагается, что в поле высоких напряжений в вершине трещины происходит сдвиг. Это вызывает увеличение ширины раскрытия трещины и её рост на  $\Delta a$ . Происходит сдвиг в другой плоскости. Диффузионные процессы способны превратить острый конец трещины в тупой. Под действием сжимающих напряжений ширина раскрытия трещины уменьшается, и возникающие пластические деформации способствуют восстановлению острого устья. После чего цикл повторяется, и трещина увеличивается на очередное значение  $\Delta a_i$ .

Цикл начинается с деформаций увеличения объёма. В силу принятых допущений берега трещин будут перемещаться параллельно самим себе. Под действием возникших деформаций берега трещины начинают сближаться на значение  $\Delta b_n$ . Деформации, вызывающие смыкание трещин, ведут к смыканию берегов, но не к зарастанию самой трещины. Поэтому логично предположить, что положение устья при смыкании гладкой трещины не изменится. Так как на берег действует равномерно распределённая деформация, а размеры трещины по её длине различны, то можно утверждать, что в микроструктуре будут происходить одновременно пластические  $\epsilon_{пл}$  и упругие  $\epsilon_{уп}$  деформации. Пластическое формирование микроструктуры происходит в результате того, что на определённых этапах увеличения объёма будет смыкаться трещина. Если объёмные деформации увеличения объёма, которые появляются на берегах трещины,  $\Delta V_n$ , будут меньше либо равны эффективной ширине раскрытия трещины  $V_T$ , будет происходить пластическое деформирование. При  $\Delta V_n > V_T$  берега трещины встречаются друг с другом. Часть трещины начинает работать как сам материал, и на этом участке упругие деформации  $\epsilon_{уп}$  преобладают над пластическими  $\epsilon_{пл}$ . При параллельности берегов трещины их смыкание возможно, и общую деформацию пластины можно выразить через пластическую и упругую части  $\epsilon = \epsilon_{пл} + \epsilon_{уп}$ .

Так как пластическое деформирование возможно только в зоне ширины раскрытия трещины, то  $\Delta b_n = \epsilon_{пл}$  и  $\epsilon = \Delta b_n + \epsilon_{уп}$ .

Для количественной оценки доли пластического деформирования можно ввести понятие эффективной ширины раскрытия трещины, ко-

торое можно определить как средний размер её ширины. Эффективная ширина раскрытия трещины  $b$  зависит от её длины  $a$  и ширины раскрытия  $b$  и может быть определена геометрически:

$$b = a \cos(\varphi/2)$$

Тогда деформация изменения линейных размеров образца при увеличении объёма материала

$$\varepsilon = n_T a \cos(\gamma/2),$$

где  $n_T$  - количество трещин, расположенных на таком расстоянии, что не оказывают влияния друг на друга.

При уменьшении объёма микроструктуры до значений  $V_0 - \Delta V_y$  ( $V_0$  - начальный объём материала), равномерно распределённая на берегах трещины деформация усадки вызывает её раскрытие. Деформации берегов при размыкании трещины до её эффективного начального раскрытия  $b$  можно отнести к упругой части усадочных деформаций. После этого наступает период пластического деформирования. В силу принятых допущений, трещина не может искривить свои берега, а материал изменить свои средние характеристики. Поэтому в случае  $\Delta V_y > V_T$  происходит увеличение длины трещины на значение  $\Delta a_y$ . Одновременно увеличивается ширина её раскрытия  $\Delta b_y$ . Абсолютные значения  $\Delta b_y$  и  $\Delta a_y$  зависят от начальных  $b_0$  и  $a_0$  и деформации усадки, проявляемых на берегах трещины  $\Delta \varepsilon_y$ . Между увеличением ширины раскрытия трещины и приращением её длины существует зависимость  $\Delta a_y = \Delta b_y / 2 \operatorname{tg}(\gamma/2)$ , где  $\gamma$  зависит от геометрии трещины.

Так как ширина раскрытия определяется значением деформации усадки и в нашем случае равна ей, то

$$\Delta a_y = \Delta \varepsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\gamma/2).$$

Следовательно, общая линейная усадка образца с трещиной при уменьшении объёма материала

$$\varepsilon_y = n \Delta \varepsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\gamma/2),$$

где  $n$  - количество не оказывающих влияния друг на друга трещин.

Увеличение объёма материала вызывает неравномерное распределение деформаций на берегах трещин.

Анализ показал, что в силу геометрических особенностей взаиморасположения трещин и их размеров возникают градиенты деформаций, что вызывает появление деформаций сдвига  $\varepsilon_{сд}$ . Последние могут возникнуть как на самом берегу трещины, так и у её устья. На берегу трещины  $\varepsilon_{сд}$  способны образовывать участки выдавливания, что ведёт к образованию усталостных зародышевых трещин. Сдвиг в вершине трещины ведёт к её развитию на значение  $\Delta a$ . Градиент деформаций

определяет и направление развития такой трещины. Таким образом, уже на стадии увеличения объёма материала, при неравномерном распределении деформации набухания на берегах трещин, возможны рост трещины и появление зародышевых трещин. Происходит дробление структуры материала.

Увеличение длины трещин при изменении направления их роста и появления зародышевых трещин на этапе увеличения объёма ведут к полному изменению распределения деформаций на этапе усадки материала. Усадочные деформации появляются на новых ПР, что усиливает градиенты деформаций по значению и направлению. Возникшие новые градиенты деформаций способствуют увеличению ширины раскрытия трещин  $|\Delta b_y$ , их протяжённости. При этом происходит увеличение и количества усталостных трещин. Такой процесс способствует накоплению повреждений в единице объёма микроструктуры.

Микроструктура КСМ представляет собой материал типа блок в блоке. Между отдельными блоками на различных масштабных уровнях сосуществуют поверхности раздела или наследственные трещины. Объёмные эксплуатационные деформации разных знаков развиваются как в каждом блоке, так и в структуре в целом. На этапе увеличения объёма происходит частичное смыкание масштабных трещин (особенно их параллельных участков) и увеличение ширины раскрытия на участках разнонаправленных деформаций. Этап уменьшения объёма характеризуется увеличением ширины раскрытия трещин. Как при увеличении объёма материала, так и при его уменьшении происходит концентрация напряжений растяжения в вершине наследственной трещины, что вызывает её подрастание. Таким образом, в структуре материала появляется новая структурная неоднородность - эксплуатационные трещины. Таким образом, можно предположить, что бетон разделён на своеобразные структурные блоки, внешними границами которых являются технологические трещины. При температурно-влажностном воздействии на бетон в период его эксплуатации можно предположить, что интегральные изменения объёма материала связаны с индивидуальными изменениями каждого структурного блока. Поэтому была определена задача изучения и анализ явлений, протекающих на внутренних поверхностях раздела (берегах технологических трещин) при знакопеременном воздействии среды эксплуатации.

Анализ показал, что деформации усадки приводят к увеличению повреждённости принятой модели бетона. Качественное отличие при сохранении общего одинакового изменения повреждённости заключается в том, что в одном случае происходит накопление объёмных по-

вреждений без изменения протяжённости технологической трещины, а во втором изменение повреждённости связано с ростом начальной трещины. Как в том, так и в другом случае изменение повреждённости может быть связано с начальной повреждённостью материала. Аналогичный анализ был проведен для процесса увеличения объёма материала. Увеличение материала в объёме приводит к уменьшению ширины раскрытия трещины на величину  $\Delta b$ . При общем уменьшении ширины раскрытия трещины протяжённость берегов увеличивается. Поэтому можно предположить, что при достижении критических значений деформации, целостность материала может быть нарушена, особенно в точках локализации деформации сдвига. Это ведёт к увеличению повреждённости материала. Кроме того, не исключена ситуация, когда в устье технологической трещины берега начнут смыкаться, что должно привести к деформациям растяжения в материале у кончика трещины. Это приведёт к её подрастанию. Можно заключить, что, как при уменьшении объёма, так и при его увеличении, повреждённость материала может изменяться или за счёт образования новых трещин или за счёт роста существующих.

Потенциальная возможность роста и трансформации технологических трещин в эксплуатационные при знакопеременных объёмных изменениях материала ставит задачу изучения влияния количества циклов изменения объёма на накопление повреждений в бетоне. Увеличение и уменьшение объёма материала происходит при его эксплуатации в условиях периодического увлажнения или высушивания, или нагревания и охлаждения. Большинство строительных конструкций эксплуатируются в зонах переменной влажности (облицовки каналов, опоры мостов, причальные гидротехнические сооружения и т.д.) или испытывают периодическое увлажнение и высушивание. Увлажнение строительных материалов и конструкций сопровождается их набуханием, а при сушке – усадкой. Деформации набухания, как и деформации усадки, должны привести к изменению повреждённости материала за счёт трансформации технологических трещин в эксплуатационные.

Из проведённых ранее опытов известно, что увеличение количества циклов увлажнения и высушивания ведёт к росту трещин, что изменяет повреждённость материала. На кинетику повреждённости оказывает влияние состав бетона. Поэтому были построены модели влияния количества цемента, количества наполнителя и его дисперсности на изменение роста трещин при увлажнении – высушивании.

Анализ характера накопления эксплуатационных трещин после 80 и 110 циклов показал, что эксплуатационные трещины развиваются из

технологических. Можно предположить, что эксплуатационные трещины завершают дробление материала на крупные блоки. Это характерно для составов с незначительным накоплением дефектов в первые циклы увлажнения-высушивания. Так как бетон представляет собой материал типа «структура в структуре», где каждый большой блок состоит из содружества более мелких, то можно предположить, что объёмные деформации каждого такого блока могут привести к его дроблению на подблоки. При этом рисунок трещин внутри блока повторяет рисунок трещин на более высоком масштабном уровне. Такое дробление структурных блоков приводит к интенсивному развитию эксплуатационных трещин.

**Вывод:** Проведенные исследования и анализ позволяют сделать заключение о необходимости проведения дальнейших исследований влияния технологической поврежденности на прочность, кинетику разрушения, трещиностойкость и деформации железобетонных изгибаемых элементов конструкций.

### Литература

1. Баженов Ю.М. Технология бетона.- М.: Высш. шк., 1987.- 415 с.
2. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса: Город мастеров, 1998.- 168 с.
3. Дорофеев В.С., Левченко Н.В., Пушкарь Н.В. Несущая способность технологически поврежденных железобетонных балок // Вісник ОДАБА. Вип. №2.-Одеса, 2000.- С.16-19.
4. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.
5. Малинина Л.А., Батраков В.Г. Бетоноведение: настоящее и будущее //Бетон и железобетон.- 2003.-№1.-С.2-6.
6. Пушкарь Н.В., Бреднев А.М., Ковров А.В. Оценка технологической поврежденности бетонных конструкций // Вісник ОДАБА. Вип.№7.- Одеса:2002.- С. 144 – 149.
7. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Залесов А.С., Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность композиционных строительных материалов и конструкций //Транспортное строительство.-1990.- №7. - С.39 – 40.
8. Ушеров-Маршак А.В., Бабаевская Т.В., М. Циак. Методологические аспекты современной технологии бетона // Бетон и железобетон.- 2002.- №1.- С.5-7.
9. Холмянский М.М. Работа бетонной балки с одиночными трещинами или разрезами // Бетон и железобетон.-2003.-№1.- С.20-24.
10. Чернявский В.Л. Адаптация бетона. Днепропетровск: Нова ідеологія, 2002.- 116 с.
11. Guo Zhen-hau, Zhang Xiu-gin. Investigation of complete stress-strain deformation curves for concrete in tension// ACI Materials Journal.1987.-V.84, N 4.
12. Marzouk H., Chen Z. Fracture energy and tensile properties of high-strength concrete // Journal of civil engineering. -1995.-V.7, N 2.