
Ультразвуковой контроль структуры бетона



**Штенгель
Вячеслав
Гедадиевич**

Старший науч-
ный сотрудник
ОАО «ВНИИГ
им. Б. Е. Веде-
неева»,
канд. техн. наук.

К сожалению, на серьезность многих проблем строительной отрасли принято обращать внимание только при выяснении причин аварий зданий и сооружений. Одна из этих проблем — недостаточный и упрощенный контроль изготовления и эксплуатации строительных конструкций. Бетон в конструкциях можно считать однородным материалом с усредненными характеристиками только приближенно. На самом деле в конструкциях наблюдается сочетание неоднородной композиции составляющих бетонной смеси, микро- и макродефектов. Своевременный контроль фактического состояния (мониторинг) конструкций и их участков обеспечит надежную долговременную эксплуатацию сооружений.

Некоторые особенности изменения структуры бетона при изготовлении и длительной эксплуатации конструкций

Во время бетонирования конструкций составляющие бетонной смеси располагаются в пределах металлической формы или опалубки неравномерно. Это особенно заметно проявляется в крупногабаритных элементах. При расслоении фракций более тяжелый крупный заполнитель имеет тенденцию концентрироваться в нижних слоях блоков или элементов. При этом разница характеристик верхних и нижних слоев бетона может достигать 10–15%. Поверхность укладываемого бетона, а также зоны, прилегающие к вертикальным стенкам опалубки, обогащаются цементным раствором, мелкими фракциями песка и обедняются крупными фракциями заполнителей.

Изменения локальной структуры и свойств возможны также из-за нарушений технологии производства и в процессе твердения бетона.

Дальнейшее изменение структуры и свойств бетона происходит в эксплуатационный период под воздействием естественного старения и под влиянием большого количества агрессивных факторов. Наиболее интенсивное изменение структуры происходит в поверхностных слоях бетона. По данным американских исследователей разница в прочностях поверхностных и глубинных слоев бетона может достигать 30%, а зона менее прочного бетона может распространяться на глубину до 300 мм от поверхности. Микроразрушения контактных слоев цементный камень — заполнитель и бетон — арматура могут трансформироваться в достаточно значительные дефекты, способствующие ускорению процессов разрушения бетона и коррозии арматуры. Развиваются макродефекты в виде трещин и расслоений. Источником этого изменения макроструктуры часто бывают развивающиеся собственные дефекты бетонирования. Наибольшую опасность представляет концентрация дефектов в опасных сечениях.

Таким образом, структура и физико-механические характеристики конструкции часто неоднородны и по сечению, и по длине, что сильнее всего проявляется, когда части крупногабаритных элементов и конструкций длительное время эксплуатируются в отличающихся условиях, например, в верхних и нижних концах сборных колонн фундаментов турбоагрегатов, на солнечной и теневой сторонах, на наружных и внутренних гранях. Игнорирование этих различий — один из основных источников ошибок при анализе полученных результатов измерений.

Контроль структуры бетона в конструкциях

В конструкции необходимо разделить состояние поверхностных и глубинных слоев, выявить значительные локальные аномалии физико-механических и структурных характеристик бетона.

Контроль поверхностных слоев осуществляется как ультразвуковым, так и механическими методами НК, а глубинных — только ультразвуковым методом при сквозном прозвучивании конструкции.

Величина коэффициента вариации анализируемого информационного параметра НК, получаемого при статистической обработке всех результатов измерений, свидетельствует об общем состоянии конструкции. Но методически при обследовании необходимо разделить контр-

олируемые участки на бездефектные с однородной структурой, в которых определяются фактические физико-механические и структурные характеристики материала, и на участки, в которых наблюдаются аномалии результатов, соответствующие отклонению характеристик и нарушению структуры.

При сплошном контроле крупноразмерной конструкции, например, протяженной стены, с целью определения прочности бетона и выделения дефектных зон обычно применяется способ двухэтапного контроля [1].

На первом этапе количество участков контроля назначается из условий: не менее одного на 4 м^2 контролируемой поверхности для плоских и массивных конструкций (плит, панелей, плотин, стен и т. п.) и не менее одного на 4 м длины конструкции для линейных конструкций (балок, колонн и т. п.).

Для надежного контроля всей зоны крупногабаритной конструкции, опасной с точки зрения появления дефектов, преобразователи перемещают по предварительно нанесенной разметке в виде сетки, образуемой пересечением взаимно-перпендикулярных линий. На противоположной поверхности контролируемой конструкции наносится такая же сетка. В процессе испытаний преобразователи устанавливают в точки пересечения разметочных линий — узлы. Обычно разметочная сетка имеет крупные ячейки: от $0,35 \times 0,35 \text{ м}$ до $1,0 \times 1,0 \text{ м}$ в зависимости от размеров общей контролируемой поверхности и сечения конструкции. Затем на втором этапе в местах, где имеются значительные отклонения акустических характеристик, для определения границ участков с нарушенной структурой проводятся повторные измерения по узлам более частых сеток.

Однако таким образом сложно оценить границы областей изменения величины информационного акустического параметра, соответствующих различным уровням дефектности конструкции. При большом числе измерений выделить различные уровни дефектности наиболее просто и доступно, используя гистограммы распределения параметра.

Если в качестве информационного параметра используется скорость распространения ультразвука, то используемый метод анализа гистограмм заключается в следующем. В допущении, что исходный состав бетона в пределах контролируемой части конструктивного элемента стабилен и однороден в нормативных пределах, весь диапазон совокупности полученных значений локальной скорости разбивается на

интервалы по 50 м/с. Далее определяется частота повторяемости результатов в каждом интервале, форма гистограммы и проводится анализ характерных участков. Оценивается огибающая, проходящая через центры интервалов, и рассматривается ее максимум в области анализируемых скоростей. Затем в этой зоне определяется средняя скорость, C_{cp} , ультразвукового сигнала по формуле $C_{cp} = \sum n c_{cp} / \sum n$, где n — частота повторения значений скорости в интервале, c_{cp} — средняя скорость в интервале.

После определения средней скорости в области высоких скоростей рассматриваются три диапазона: в пределах $(0,95 \div 1,05) C_{cp}$, меньше $0,95 C_{cp}$ и больше $0,95 C_{cp}$.

Первый диапазон соответствует фактическим физико-механическим характеристикам бетона с учетом естественной неоднородности (среднеквадратическое отклонение скорости около 2,5%).

Второй диапазон характерен для бетона с нарушенной структурой, при которой прочность бетона снижается более чем на 20 % (для тяжелого бетона 1 % изменения скорости ультразвукового сигнала соответствует примерно 4 ÷ 6 % изменения прочности бетона на сжатие). На участках конструкций, где сосредоточены пониженные локальные скорости, проводится подробная дефектоскопия с оценкой границ зоны дефектов. Следует отметить, что наличие дефектных зон, особенно в опасных сечениях, часто значительно сильнее ослабляет конструкцию, чем в случае общего понижения прочности бетона относительно проектных значений [2].

Третий диапазон характерен для локальных концентраций арматуры и закладных или скопления крупного заполнителя по трассе прохождения ультразвукового сигнала. Во второй и третий диапазоны попадают также ошибки разметки и оператора. Необходимо подчеркнуть, что единичные результаты из второго и третьего диапазонов скоростей не должны учитываться при оценке исходных физико-механических характеристик бетона.

Для бездефектных конструкций характерен один максимум гистограммы в ее верхнем участке с максимальными скоростями. Для конструкций с участком нарушенной структуры — два максимума (в верхнем — со скоростями, характерными для естественно состарившегося исходного материала, и в нижнем — с минимальными скоростями, соответствующими кажущемуся снижению прочности дефектного бетона). Для кон-

струкций с общим нарушением монолитности структуры ярко выраженного максимума гистограммы не наблюдается.

Для установления наглядных границ дефектных зон используется методика нанесения на схему измерений линий равных скоростей (испид) с выделением областей пониженных скоростей.

Предложенная методика ультразвуковой дефектоскопии была, в частности, использована в процессе исследований массивных монолитных железобетонных стен, получивших повреждения в результате взрывов.

В результате интенсивного импульсного воздействия взрывной волны произошло разрушение монолитной структуры бетона, нарушение сцепления бетона с арматурой. При этом часть трещин вышла на поверхность. Однако большое количество внутренних повреждений внешне не проявилось, и фактические границы ослабленных зон были не ясны. Это, в частности, привело к ошибочной концепции в первоначально предложенной технологии ремонта конструкций без восстановления проектной несущей способности элементов с нарушенной внутренней структурой материала.

В зонах воздействия взрывных волн проводилось сплошное диагностирование отдельных конструктивных элементов. Для повышения чувствительности к дефектам структуры контроль проводился с использованием высокочастотных (для бетона) преобразователей с рабочей частотой 150 кГц. Полученные результаты позволили определить границы зон с внутренними повреждениями и, как следствие, индивидуально для каждого сохраняемого конструктивного элемента скорректировать технологию ремонтно-восстановительных работ. Фактическая прочность бетона как исходного материала оценивалась в бездефектных зонах.

Рассмотрим два примера обследования фрагментов монолитных железобетонных стен, поврежденных взрывами.

Пример 1

Проанализируем результаты контроля протяженной монолитной стены на двух участках: удаленном от зоны воздействия взрывной волны с отсутствием внешних признаков разрушений и в эпицентре воздействия взрывной волны с ярко выраженной сетью трещин и общим разрушением структуры бетона (рис. 1).

На гистограмме I по результатам измерений на первом участке стены заметен один очевидный максимум (рис. 2) в диапазоне $4350 \div 4500$ м/с.



Рис. 1. Участок монолитной железобетонной стены в эпицентре ударного воздействия взрывной волны

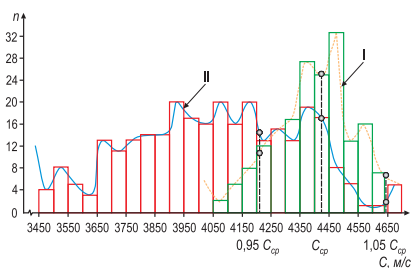


Рис. 2. Гистограммы распределения скорости на целом (I) и поврежденном (II) участках стены

Расчет средней прочности бетона по конструкции ведется в диапазоне скоростей $4050 \div 4750$ м/с, исключая крайние участки с нехарактерными величинами (менее 4050 м/с и более 4750 м/с). Соответственно, диапазон скоростей $(0,95 \div 1,05) C_{ср}$ составляет $4195 \div 4637$ м/с или, округляя по границам интервалов, $4200 \div 4650$ м/с.

При анализе гистограммы II результатов измерений на разрушенной части стены можно обратить внимание на то, что в том же диапазоне скоростей также наблюдается небольшой подъем гистограммы. Расчет средней скорости в диапазоне $4200 \div 4600$ м/с дает $C_{ср} = 396625/91 = 4359$ м/с, то есть относительно базовой скорости произошло снижение на 1,3%. Однако основные пики второй гистограммы расположены в диапазоне скоростей $3900 \div 4200$ м/с. Средняя скорость в нем составляет $C_{ср1} = 441475/109 = 4050$ м/с.

Таким образом, существует новый диапазон $(0,95 \div 1,05) C_{ср}$, который составляет $3850 \div 4250$ м/с. Уточненная средняя скорость в нем составляет $C_{ср}^1 = 550650/136 = 4049$ м/с, что в пересчете на прочность по градуировочной зависимости для данного бетона означает условное снижение прочности бетона относительно базового значения (на «здоровом» участке стены) на 32%. Такое снижение условной прочности бетона можно считать следствием разрушения структуры материала из-за импульсного воздействия взрывной волны большой интенсивности (рис. 3). Фактически средняя прочность бетона снизилась больше, так как из рассмотрения выпадает большое количество результатов в диапазоне ниже 3850 м/с, а также результатов на «бухтящих» при предварительном простукивании участках, в свою очередь свидетельствующих о нарушении монолитности бетона и отслоения его от арматуры.

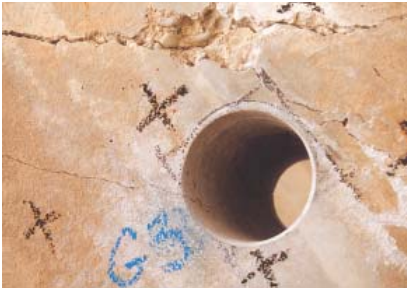


Рис. 3. Разрушение структуры бетона под ударным воздействием взрывной волны

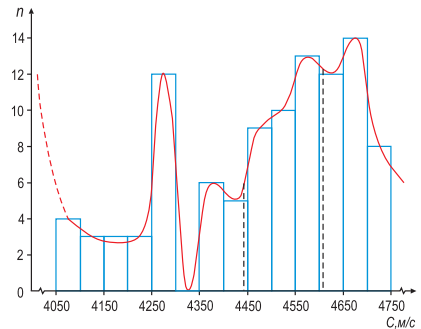


Рис. 4. Гистограмма распределения скорости для стены, разрушенной осколочным попаданием

Сравнивая две гистограммы, можно сделать вывод: при «здоровом» бетоне гистограмма имеет один явно выраженный максимум. Для бетона с общей нарушенной структурой явных максимумов не наблюдается. Они «размыты» как в области высоких скоростей, соответствующих исходной прочности бетона, так и в зоне пониженных скоростей, соответствующей новой условной прочности деструктурированного материала.

Пример 2

Проведем анализ результатов измерений на фрагменте другой монолитной стены, прилегающей к зоне осколочного попадания, то есть с характером разрушения в виде очаговой концентрации дефектов. Стена выполнена из более прочного бетона.

На гистограмме (рис. 4) заметны два максимума: в верхней части в области высоких скоростей и в нижней части в области пониженных скоростей (не считая зоны полной деструкции бетона). Необходимо найти границу скоростей, разделяющих участки неповрежденного и поврежденного бетона.

Выбирается первый участок в области высоких скоростей — с условной серединой гистограммы $C_{cp} = 4625$ м/с. Для него условный диапазон скоростей $(0,95 \div 1,05) C_{cp}$ составляет $4400 \div 4850$ м/с. Расчетная фактическая средняя скорость составляет $C_{cp} = \sum n c_{cp} / \sum n = 349900 / 76 = 4604$ м/с, соответственно диапазон скоростей $4375 \div 4834$ м/с.

На втором участке условная середина участка гистограммы расположена на максимуме — $C_{cp} = 4275$ м/с и, соответственно, диапазон скоростей

4050 ÷ 4500 м/с. Фактическая средняя скорость составляет $C_{cp} = \sum n c_{cp} / \sum n = 193825 / 45 = 4307$ м/с, а диапазон скоростей 4100 ÷ 4525 м/с.

Таким образом, участки диапазонов принадлежат обоим совокупностям, и границей раздела областей будет среднее значение граничных значений — 4450 м/с.

Соответственно, весь контролируемый участок стены разделяется на три прочностные зоны: с сохраненной исходной прочностью бетона (диапазон скоростей 4450 ÷ 4850 м/с), с пониженной прочностью с частично нарушенной структурой материала (диапазон скоростей 4100 ÷ 4450 м/с) и с полностью разрушенной структурой (диапазон скоростей ниже 4100 м/с). В последнюю зону входят также участки стены, на которых ультразвуковой сигнал не проходит через бетон.

Контроль структуры бетона с использованием комплексных информационных параметров ультразвукового сигнала

В ультразвуковой дефектоскопии известны варианты использования в качестве информационных параметров не только локальной скорости (времени) распространения продольной и поперечной волн, но и других характеристик ультразвукового сигнала, прошедшего через материал: амплитудно-частотных, спектральных, реверберационных [3]. Широкому применению этих параметров препятствует трудоемкость корректного съема информации, достаточно сложный анализ осциллограммы принятого сигнала и сильная зависимость характеристик принятого сигнала от качества контакта пьезопреобразователей с поверхностью бетона. Тем не менее, в ряде случаев использование этой информации позволяет уточнить характеристику дефектов.

Так, при сквозном прозвучивании стен, колонн, балок обеспечивается постоянство базы измерения, применение сухого точечного контакта, вязкого акустического контактного материала типа пластилина, плотное долговременное закрепление преобразователей или использование закладных датчиков. Все это снижает зависимость параметров прохождения сигнала от условий контакта.

Исследования автора свидетельствуют о возможности значительного увеличения чувствительности ультразвука к дефектам и изменениям структуры при использовании сочетания различных параметров сигнала.

Наиболее доступным комплексным информационным параметром можно считать коэффициент K_a , сочетающий скорость C_L прохождения сигнала через материал и длительность τ_ϕ его переднего фронта в виде $K_a = C_L / \tau_\phi$, где τ_ϕ — разность времени последовательного достижения нормированной первой полуволной уровней 0,15 и 0,70.

Изменение структуры влияет на составляющие K_a в противофазе, т. е., например, при разрыхлении структуры C_L снижается, а τ_ϕ растет. Сравнительная оценка чувствительности параметров к дефектам может быть продемонстрирована на проведенном опыте.

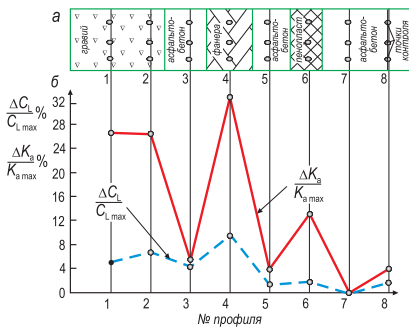


Рис. 5. План расположения различных дефектов в асфальтобетонном блоке (а) и графики относительного изменения информационных параметров (б): $\Delta C_L = C_{L\max} - C_{L\text{проф}_i}$; $\Delta K_a = K_{a\max} - K_{a\text{проф}_i}$

с помощью серийного прибора УК-10П. Результаты относительного изменения параметров по профилям приведены на графиках (рис. 5), из которых очевидна намного большая чувствительность к дефектам параметра K_a .

Практика показала, что для более надежного проведения исследований, контроль дефектной зоны следует проводить методами сквозного прозвучивания (соосного или диагонального) с обязательным соблюдением постоянства базы измерения, идентичности взаимного положения пьезопреобразователей при их перемещении в очередные точки контроля и идентичности условий контакта преобразователей с бетоном во всех сравниваемых точках контроля.

При установке излучателя и приемника на одной стороне конструкции в области максимальных напряжений параметр K_a можно использо-

Был изготовлен образец из литого асфальтобетона в форме параллелепипеда размерами $335 \times 495 \times 200$ мм, состоящего из двух слоев по 100 мм, между которыми уложены различные предметы, имитирующие определенные дефекты: слой гравия толщиной 10 мм, фанерная пластина толщиной 5 мм, пластина из пенопласта толщиной 10 мм. Проводилось сквозное прозвучивание образца по толщине, при этом ультразвуковой импульс проходил через дефекты. Измерения проводились

вать при контроле изменения структурных характеристик бетона вследствие физического воздействия на конструкцию.

При обеспечении надежного контакта преобразователей с поверхностью бетона или при стационарной установке их для мониторинга конструкции, чувствительность комплексных информационных параметров к изменению структуры можно еще повысить, введя в их состав амплитудные характеристики прошедшего через материал сигнала.

Естественно, что такие сложные работы по дефектоскопии должны проводиться квалифицированными специалистами на аппаратуре, позволяющей визуально наблюдать всю осциллограмму принятого импульса с возможностью измерений параметров различных участков. Все вышеприведенные исследования проводились на аналоговой аппаратуре типа УКБ-1М и УК-10П. Можно надеяться, что современные приборы нового поколения смогут значительно облегчить процесс контроля и повысить точность измерений и анализа результатов.

Рассмотренные примеры показывают, что в области дефектоскопии бетона существует еще очень большой потенциал, как в совершенствовании средств измерения, так и в развитии методической базы НК.

Литература

1. Почтовик Г. Я., Липник В. Г., Филонидов А. М. Дефектоскопия бетона ультразвуком в энергетическом строительстве. — М.: Энергия, 1977. — 123 с.
2. Гордон С. С. Долговечность железобетонных конструкций. — Механизация строительства. 1998. № 7. С. 14–17; № 8. С. 22–25.
3. Бобров А. В. Акустическая дефектоскопия бетона. — В кн. Изготовление и контроль качества строительных конструкций. — М.: НИИСК, НИИЖБ, 1987, с. 68–75.