

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

APPLICATION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS FOR ASSESSING THE STRENGTH OF CONCRETE OF THE REINFORCED-CONCRETE STRUCTURES DESIGNED FOR LONG-TERM OPERATION

С. Н. Ковшар,

кандидат технических наук,
доцент Белорусского национального
технического университета,
г. Минск, Беларусь

Мехди Хормози,

аспирант Белорусского
национального технического
университета,
г. Минск, Беларусь

В. В. Бабицкий,

доктор технических наук,
профессор Белорусского
национального технического
университета,
г. Минск, Беларусь

Рассмотрены методы контроля прочности бетона, при которых последний не теряет свои эксплуатационные качества и не нарушается целостность изделия. Выявлена и обоснована необходимость использования неразрушающих методов контроля прочности. Показана возможность использования методов, основанных на упругом отскоке и ударном импульсе, для оценки прочности длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций.

The methods for testing the strength of concrete, after performing of which concrete does not lose its performance and the product integrity does not get broken, are considered. The necessity of use of the non-destructive methods for control of the strength has been revealed and justified. The possibility of use of the methods based on the rebound resilience and impact pulse for assessment of the strength of reinforced concrete structures designed for longterm operation has been demonstrated.

ВВЕДЕНИЕ

При определении прочности бетона с помощью методов неразрушающего контроля необходимо учитывать, что все эти методы являются косвенными. Выделить какой-то один метод нельзя: все они обладают своими достоинствами, недостатками и ограничениями в применении. На начальном этапе существования конструкции обычно осуществляется контроль соответствия проекту линейных размеров и отсутствия их существенных отклонений от нормативных значений. В существующем сооружении оценка прочностных показателей конструктивных единиц обычно осуществляется двумя способами. Первый основывается на нагружении конструкции вплоть до ее разрушения, и таким образом определяется предельная несущая способность. Однако применение такого метода является, по понятным причинам, экономически нецелесообразным. Гораздо более привлекательны в этом плане неразрушающие методы, которые подразумевают применение для оценки состояния конструкций специальных приборов. В этом случае обработка полученных результатов измерений осуществляется при помощи компьютерных программ, что позволяет получить значительную достоверность конечных характеристик. Наиболее весомым фактором, определя-

ющим метод, средства измерения и контроля, является предельно допустимая погрешность измерений. Также немаловажно удобство проведения работ, простота обработки результатов. Основой неразрушающих методов являются косвенные характеристики, такие как отпечаток на бетоне; энергия, затраченная на удар; напряжение, приведшее к местному разрушению бетона. Рассмотрим подробнее часто применяемые методы неразрушающего контроля для основных строительных материалов.

МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Методы местных разрушений – самые точные из методов неразрушающего контроля прочности, поскольку для них допускается использовать универсальную градуировочную зависимость, в которой изменяются всего два параметра: крупность заполнителя и тип бетона.

Метод отрыва со скалыванием и метод скалывания ребра конструкции заключаются в регистрации усилия, необходимого для скалывания участка бетона на ребре конструкции, либо местного разрушения бетона в процессе вырывания из него анкерного устройства. Метод отрыва со скалыванием является единственным неразрушающим методом контроля прочности, для которого в стандартах прописаны градуировочные зависимости. Этот метод характеризуется наибольшей точностью. Метод отрыва стальных дисков может быть использован при испытании бетона в густоармированных конструкциях, когда метод отрыва со скалыванием, а нередко и метод скалывания ребра конструкции (с учетом его ограничений), не могут быть использованы. Метод скалывания ребра конструкции используется главным образом для контроля линейных элементов (свай, колонн, ригелей, балок, перемычек и т. п.). В отличие от методов отрыва и отрыва со скалыванием, он не требует подготовительных работ. Однако при защитном слое менее 20 мм и повреждениях защитного слоя метод неприменим. Основным недостатком методов местных разрушений – повышенная трудоемкость.

Методы ударного воздействия на бетон – самые распространенные из всех неразрушающих методов контроля прочности бетона. Суть метода ударного импульса заключается в регистрации энергии удара, возникающей в момент соударения бойка с поверхностью бетона. Определение прочности бетона методом ударного импульса является достаточно простой операцией. Результаты измерений выдаются в единицах измерения прочности на сжатие. Кроме того, с использованием данного метода можно производить измерение прочности под различными углами к поверхности объекта, переносить накопленные данные на компьютер. Метод упругого отскока заключается в измерении величины обратного отскока ударника при соударении с поверхностью бетона и основан на измерении поверхностной твердости бетона. Требования к подготовке участков для испытаний, к рас-

положению и количеству мест удара, а также к экспериментам для построения градуировочных кривых такие же, как в методе пластической деформации. Метод пластической деформации основан на измерении размеров отпечатка, который остался на поверхности бетона после соударения с ней стального шарика. Метод устаревший, но до сих пор его используют из-за дешевизны оборудования. При использовании молотка Кашкарова К. П. прочность бетона определяется из соотношения размеров отпечатков на металлическом стержне и бетоне. Также существуют приборы, работа которых основана на вдавлении штампа в поверхность бетона путем удара или статического давления заданной силы.

Ультразвуковой метод заключается в регистрации скорости прохождения ультразвуковых волн. По технике проведения испытаний можно выделить сквозное ультразвуковое прозвучивание, когда датчики располагают с разных сторон тестируемого образца, и поверхностное прозвучивание, когда датчики расположены с одной стороны. Метод сквозного ультразвукового прозвучивания позволяет, в отличие от всех остальных методов неразрушающего контроля прочности, контролировать прочность не только в приповерхностных слоях бетона, но и прочность в теле бетона конструкции. Ультразвуковые приборы могут использоваться не только для контроля прочности бетона, но и для дефектоскопии, контроля качества бетонирования и пр. Градуировочную зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона на сжатие определяют предварительно для конкретного состава бетона. Ультразвуковой метод позволяет осуществлять массовые испытания изделий любой формы, вести непрерывный контроль нарастания или снижения прочности, он показал свою эффективность в коррозионных исследованиях состояния бетона в разнообразных коррозионных средах. Недостатком метода является погрешность при переходе от акустических характеристик к прочностным. Ультразвуковые приборы не рекомендуется использовать для контроля качества высокопрочных бетонов, поскольку рекомендуемый диапазон контролируемых прочностей согласно [1] находится в диапазоне 10–40 МПа.

В настоящее время сложилась интересная ситуация: существующие нормативные документы содержат устаревшие требования как к самим методам контроля, так и приборным средствам. Дело в том, что существующие ТНПА на методы неразрушающего контроля разрабатывались в период, когда основой строительства являлся сборный железобетон. Поэтому они основывались на методиках, предназначенных в основном для неразрушающего контроля при производстве сборных железобетонных изделий. Вопросы же контроля монолитного железобетона рассмотрены очень слабо.

Так, например, согласно [1] применение способа поверхностного прозвучивания при ультразвуковом методе контроля прочности бетона не допускается. Разрешается только сквозное прозвучивание. Однако использование метода сквозного прозвучивания на ре-

альных объектах крайне затруднено, очень сложно обеспечить приемлемую степень соосности приемного и передающего преобразователей, которые должны быть расположены с разных сторон конструкции. Зачастую негде провести длинный проводник к преобразователю, да и потери энергии в длинных проводах будут слишком велики, чтобы результаты измерений можно было считать достоверными.

Потребителей приборов неразрушающего контроля прочности бетона можно условно разделить на три группы [2, 3]:

- заводы стройиндустрии железобетонных изделий, кирпичные, керамической плитки и т. д. Они имеют в своем составе лаборатории, оборудованные прессами, позволяющими проводить испытания стандартных образцов, и специалистов, которые могут квалифицированно провести такие испытания. Заводы, как правило, используют регламентированные составы смесей для изготовления изделий. Сырье поставляется несколькими поставщиками, качество продукции которых проверено. Поэтому эти предприятия могут устанавливать градуировочные зависимости под производимые у них составы изделий;

- предприятия и фирмы, занимающиеся строительством сооружений из монолитного железобетона. Перед ними стоят две задачи: контролировать распалубочную прочность бетона, то есть следить за состоянием бетона, при котором в соответствии с регламентами можно снимать опалубку, и контролировать техническое соответствие поставляемого бетона заявленным паспортным характеристикам. При этом основными требованиями здесь являются максимальная простота использования, универсальность и достаточная точность, то есть с прибором должен уметь работать неквалифицированный специалист по прочтению паспорта прибора;

- предприятия и фирмы, занимающиеся техническим обследованием существующих зданий и сооружений. Специалисты этих организаций, как правило, до начала обследований не имеют сведений ни о составе материалов несущих конструкций, ни о возрасте, так как зачастую необходимость обследования возникает в процессе реконструкции сооружений, которым не один десяток лет. Также очень редки случаи, когда удается получить образцы-kerne бетонов обследуемого сооружения в силу ряда причин, о которых говорилось выше.

Как же выходят из такой, прямо скажем, непростой ситуации? Согласно [4] допускается использовать для уточнения градуировочной зависимости методы отрыва со скалыванием, скалывание ребра либо испытание кернов. Для этого результат, полученный одним из этих методов, делят на прочность, полученную в результате испытаний каким-либо из прочих методов неразрушающего контроля. Полученный результат называют коэффициентом совпадения.

Для обследования остальных участков конструкции результаты, полученные одним из неразрушающих методов, умножают на этот коэффициент. Так, например, в

приборах серии ИПС ввод этого коэффициента осуществляется с клавиатуры, и результаты выдаются уже с его учетом.

Проведем небольшой сравнительный анализ приборов, выпускаемых различными производителями [5–10]. Начнем с чаще всего используемого и самого простого метода – метода упругого отскока. Прибор Beton Condrol – один из самых простых и недорогих измерителей прочности. Принцип действия прибора основан на ударе с нормированной энергией бойка о поверхность бетона и измерении высоты его отскока в условных единицах шкалы прибора, являющейся косвенной характеристикой прочности бетона на сжатие. Отличительной особенностью является наличие тарировочных таблиц на корпусе прибора, учитывающих направление удара.

При измерении прочности бетона методом ударного импульса используется Beton Pro Condrol, который является наиболее популярным в настоящее время благодаря уникальному сочетанию высокой точности, удобства измерений и оптимальной комплектации с приемлемой стоимостью. Реализовано принципиально новое меню, позволяющее максимально точно настроить прибор на материал, наглядно представить и систематизировать информацию.

Приборы ИПС-МГ4.01 и ИПС-МГ4.03 имеют удобную организацию пользовательского интерфейса, выбор всех параметров измерений осуществляется сразу после включения в одном пункте меню с функцией круговой прокрутки.

Приборы ОНИКС-2.6/ОНИКС-2.51/ОНИКС-2.52 применяются при двухпараметрическом методе контроля – по упругому отскоку и ударному импульсу, что повышает достоверность измерений. Имеют малую погрешность измерений – не более 8 %, а также выбор коэффициента вариации для расчета класса бетона и размаха измерений.

Для определения прочности бетона методом ультразвука используется прибор УК1401М, имеющий удобный анатомический корпус облегченной конструкции со встроенными высокоточными УЗ-датчиками, позволяющими проводить измерения одной рукой, и приборы ПУЛЬСАР-1.0/1.1/1.2.

Для реализации метода отрыва со скалыванием используют прибор ОНИКС-ОС, который имеет по сравнению с приборами типа ГПНВ следующие важнейшие преимущества: минимальное проскальзывание анкера и возможность автоматической установки оси вырыва. Существует также семейство приборов ПОС, в которое входит несколько модификаций: ПОС-50-МГ4; ПОС-50-МГ4 «Скол» и т. д. Отличительной особенностью приборов являются: устройство с целью измерения величины проскальзывания анкера и электронный силоизмеритель, обеспечивающий индикацию текущего значения приложенной нагрузки с фиксацией максимального значения, а также индикацию скорости нагружения в процессе испытаний.

Для оценки возможности использования всего многообразия рассмотренных методов и приборов неразру-

шающего контроля с целью определения прочности бетона длительно эксплуатирующихся железобетонных конструкций следует учитывать следующее: все методы неразрушающего контроля являются косвенными. Выделить наибольшую эффективность одного из методов нельзя, поскольку все они обладают своими достоинствами, недостатками и ограничениями в применении. Наиболее весомым фактором, определяющим метод и средства измерения и контроля, является предельно допустимая погрешность измерений. Также немаловажно удобство проведения работ, простота обработки результатов. Этим критериям отвечают поверхностные методы, основанные на определении твердости поверхности бетона. Основой недостаток этих методов заключается в том, что при воздействии на поверхность железобетонной конструкции, которая в процессе эксплуатации подвергается воздействию эксплуатационной среды (карбонизация бетона), не всегда возможно адекватно оценить прочность бетона. Прочность бетона определяют по градуировочным кривым, имея значение «косвенной характеристики» (отношение диаметров отпечатков или величину упругого отскока). Среднюю величину «косвенной характеристики» вычисляют по данным пяти (и более) измерений, выполненных на определенном участке поверхности бетона. При этом частные значения не должны отличаться от среднего более чем на $\pm 15\%$.

Если рассматривать эти два метода, то наиболее предпочтительной является оценка прочности бетона при измерении высоты упругого отскока, так как, во-первых, на величину отскока влияют не только поверхность, но в определенной мере и внутренние слои бетона, и, во-вторых, определение прочности бетона методом пластической деформации является весьма трудоемким.

К сожалению, в процессе длительной эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций свойства поверхностных слоев бетона кардинально изменяются, в частности, по причине карбонизации. А этот фактор практически не нашел должного освещения в литературе. Следовательно, реальная прочность бетона не со-

ответствует «кажущейся», полученной в процессе измерений.

Для подтверждения возможности использования метода упругого отскока для оценки прочности бетона длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций была проведена серия экспериментов в лабораторных условиях и непосредственно при проведении обследования. Было подобрано три состава бетонных смесей с расходом цемента 250, 350 и 450 кг на 1 м^3 бетона. В качестве крупного заполнителя использовали гранитный щебень фракции 5–20 мм, в качестве мелкого заполнителя – природный песок с модулем крупности 2,8. Из подобранных составов были изготовлены опытные образцы-кубы с ребром 150 мм (по 4 образца каждого состава). Образцы твердели в нормально-влажных условиях 28 суток, потом их высушивали до постоянной массы, а затем помещали в установку для ускоренной карбонизации бетона (концентрация углекислого газа 100 % при относительной влажности воздуха 70 %). Для получения образцов с различной глубиной карбонизации варьировали время выдержки образцов в камере (8 часов, 1 сутки и 2 суток). Далее определяли фактическую прочность на сжатие опытных образцов и прочность на сжатие неразрушающими методами (пластической деформации и упругого отскока). Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что при увеличении расхода цемента глубина карбонизации бетона закономерно снижается. Значения «кажущейся» прочности бетона, определенные методами пластической деформации и упругого отскока, возрастают при увеличении глубины карбонизации бетона. Возрастают отклонения прочности, определенной неразрушающими методами, от фактического значения прочности образцов, причем максимальные значения отклонений увеличиваются при уменьшении расхода цемента.

В таблице 2 приведены результаты оценки прочности бетона железобетонного ригеля административного здания, построенного в 1978 году в г. Минске, различны-

Таблица 1 – Фактическая прочность бетона на сжатие опытных образцов и значение прочности, определенное неразрушающими методами

Расход цемента, кг на 1 м^3 бетона	Время выдержки в установке, ч	Глубина карбонизации бетона, мм	Фактическая прочность бетона в возрасте 28 сут., МПа	Прочность бетона, МПа, определенная неразрушающим методом	
				пластической деформации	упругого отскока
250	0	0	31,2	34,2	29,5
	8	2,5		34,5	33,3
	24	3,5		38,9	35,6
	48	5,0		46,7	38,8
350	0	0	38,7	39,1	38,5
	8	2,0		43,4	41,5
	24	3,0		45,8	43,3
	48	4,0		49,1	46,5
450	0	0	51,4	53,2	48,6
	8	1,5		55,4	52,2
	24	2,0		57,1	54,3
	48	3,0		59,2	56,1

Таблица 2 – Прочность бетона на сжатие железобетонного ригеля, определенная различными методами неразрушающего контроля

Наименование метода неразрушающего контроля	Значение прочности, МПа	Фактическая прочность бетона, МПа	Глубина карбонизации бетона, мм	Оценка применимости метода
Метод пластической деформации (молоток Кашкарова К. П.)	48,9	32,4	2,8	+16,5
Метод упругого отскока (склерометр ОМШ-1)	35,6			+3,2
Метод ударного импульса	36,3			+3,9
Метод отрыва со скалыванием (эталонный метод)	34,8			+2,4

Таблица 3 – Прочность бетона на сжатие мостовой балки, определенная различными методами неразрушающего контроля

Наименование метода неразрушающего контроля	Значение прочности, МПа	Фактическая прочность бетона, МПа*	Глубина карбонизации бетона, мм	Оценка применимости метода
Метод пластической деформации (молоток Кашкарова К. П.)	35,5	48,8	4,5-5,2	-13,3
Метод упругого отскока (склерометр ОМШ-1)	44,6			-4,2
Метод ударного импульса	39,3			-9,5

*Фактическая прочность бетона определялась методом отрыва со скалыванием с использованием прибора ОНИКС-ОС.

ми неразрушающими методами, а в таблице 3 – результаты оценки прочности бетона мостовой балки путепровода на автомобильной дороге Брест – Минск – граница России (д. Серафимово).

Проанализировав данные таблицы 2, можно сделать вывод, что наибольшую погрешность в оценке прочности бетона показал метод пластической деформации (молоток Кашкарова К. П.). Близкие результаты получены при использовании методов упругого отскока и ударного импульса. Метод отрыва со скалыванием подтвердил целесообразность его использования как эталонного метода при оценке достоверности неразрушающих методов контроля.

Результаты, представленные в таблице 3, на первый взгляд являются нелогичными. Однако если учитывать условия эксплуатации конструкции (воздействие замораживания и оттаивания), то полученные результаты являются обоснованными. Следует отметить, что при проведении обследования на поверхности мостовых балок имелись явные признаки морозного разрушения, а именно шелушение поверхности. Что касается погрешности при оценке прочности бетона неразрушающими методами, то наибольшую погрешность, как и в предыдущем примере, показал метод пластической деформации, а наименьшую – метод упругого отскока.

С целью упрощения обработки большого количества экспериментальных данных при использовании основных видов неразрушающего контроля был предложен

соответствующий программный продукт, являющийся частью вычислительного комплекса «Технолог». Пример применительно к ультразвуковому импульсному методу показан на рисунке 1.

Задача инженера, проводящего обследование бетонной или железобетонной конструкции (в частности, мостовых), – ввести основные влияющие факторы и измеренную скорость ультразвука, расчеты же производятся автоматически в соответствии с уже «зашитыми» разнообразными градуировочными зависимостями. Практика использования программы показала достаточную точность вычислений. В настоящее время программный продукт совершенствуется в части увеличения количества влияющих факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирована область применения основных методов неразрушающего контроля прочности бетона бетонных и железобетонных конструкций.

Представлены наиболее эффективные (достоверные) методы для оценки прочности бетона длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Полученные экспериментальные результаты подтвердили правильность выбора методов упругого отскока и ударного импульса для достоверной оценки прочности бетона длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Расчет прочности бетона по градуировочным зависимостям

Диспетчер комплекса Вид контроля

Вид цемента

- Цемент марки 400 и выше с содержанием минеральных добавок до 25 %
- Цемент марки 300 и ниже с содержанием минеральных добавок сверх 40 %
- Бвстротвердеющий цемент

Особенности состава бетона

Ориентировочный расход цемента, кг/м куб

Вид крупного заполнителя

Количество песка размером менее 0,63 мм, %

Максимальная крупность заполнителя, мм

Условия эксплуатации конструкции

- вне помещения
- в помещении

Средняя годовая температура, град С

Расчеты

Неразрушающий метод:

ультразвуковой импульсный (по скорости сигнала)

Расчет прочности бетона

Скорость ультразвука, м/с

3000 4500 6000

Прочность бетона, МПа

Рисунок 1 – Окно расчета прочности бетона на сжатие

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности : ГОСТ 17624-87.
2. Улыбин, А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений. – М. : Стройиздат, 1995. – 136 с.
3. Зубков, В. А. Определение прочности бетона : учебное пособие. – М. : изд- во АСВ, 1998. – 120 с.
4. Бетоны. Определение прочности неразрушающими методами : ГОСТ 22690-88.
5. Бербеков, Ж. В. Неразрушающие методы контроля прочности бетона // Молодой ученый. — 2012. — № 11. — С. 20–23.
6. Попов, К. Н., Каддо, М. Б., Кульков, О. В. Оценка качества строительных материалов. – М. : Ассоциация строительных вузов, 1999.
7. Гулунов, А. В. Методы и средства НК бетона и железобетонных изделий // В мире НК. – 2002. – № 2 (16). – С. 24–25.
8. Клевцов, В. А., Коревицкая, М. Г. Об организационно-технических проблемах НК прочности бетона // В мире НК. – 2002. – № 2 (16). – С.16–17.
9. Штенгель, В. Г. О методах и средствах НК для обследования эксплуатируемых железобетонных конструкций // В мире НК. – 2002. – № 2 (16). – С. 12–15.
10. Губайдуллин, Г. А. Приборный комплекс оперативного контроля прочности бетона // В мире НК. – 2002. – № 2 (16). – С. 21–22.

Статья поступила в редакцию 06.05.2016.