

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Мацулевич О. В., Крень А. П.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

В настоящее время объемы неразрушающего контроля прочности бетонных и железобетонных конструкций значительно возросли. Неразрушающие методы используются как при производстве конструкций, так и при возведении, диагностике и мониторинге состояния зданий и сооружений, находящихся в длительной эксплуатации, оценке поврежденности после воздействия природных и техногенных факторов (пожаров, наводнений и др.). Значение неразрушающих методов также возросло после того, как ряд предприятий ввели систему менеджмента качества по ИСО 9001, которая требует проведения контроля производства. Применение неразрушающих методов базируется на двух нормативных документах [1, 2]: ГОСТ 17624-87, ГОСТ 22690-88, а сами методы можно разделить на три основные группы:

- основанные на локальном разрушении фрагмента изделия, не приводящем к потере работоспособности конструкции, например, отрыв со скалыванием;
- упруго-деформационные механические методы;
- ультразвуковые методы.

Рассмотрим более подробно упруго-деформационные методы. Их, в свою очередь, можно разбить на следующие группы:

- метод пластической деформации, основанный на зависимости диаметра отпечатка, образующегося при ударном взаимодействии бойка и материала (приборы типа молоток Кашкарова, молоток Физделя) от твердости (прочности) материала;
- метод упругого отскока, использующий зависимость высоты отскока от прочностных параметров бетона;
- метод ударного импульса, базирующийся на взаимосвязи величины  $dP/dT$  (где  $P$  – максимальное контактное усилие,  $T$  – время ударного взаимодействия) и прочности бетона.

Указанные методы сравнительно просты и удобны в эксплуатации. Однако можно выделить и целый ряд недостатков. Это, во-первых, неточное определение диаметра отпечатка в зависимости от шероховатости поверхности и применяемой измерительной техники для метода пластической деформации. Для метода упругого отскока это – снижение чувствительности, рост погрешности измерений и влияние пространственной ориентации приборов на результаты измерений после сравнительно недолгой эксплуатации вследствие изменения параметров пружины растяжения [3]. Влияние самой пружины на процесс соударения (удар является стесненным), что затрудняет и усложняет использование положений теории удара при расчетах. При использовании в приборах, реализующих метод ударного импульса, акселерометра измерение ускорений (контактной силы  $P$ ) можно производить лишь в относительно узком диапазоне их изменения, зависящем от чувствительности акселерометра, что не позволяет производить контроль широкого класса материалов.

В этой связи, ставилась задача разработать новый метод контроля, который давал бы возможности отстроиться от мешающих факторов и уменьшить погрешность измерений. Расширение возможностей ударных методов может быть достигнуто за счет регистрации всей кривой процесса вдавливания индентора (бойка) в испытываемый материал. Именно такими возможностями обладает метод динамического индентирования, разработанный в ИПФ НАН Беларуси. Метод заключается в нанесении локального

удара по испытываемому материалу и регистрации кривой текущей скорости перемещения индентора, которая представляет собой исходную информацию о материале.

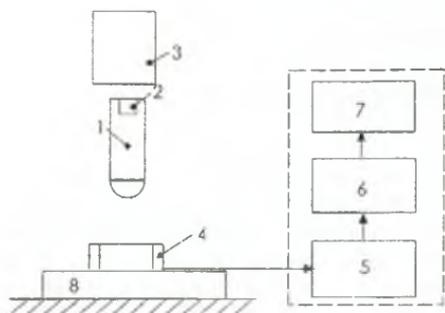


Рис. 1. Структурная схема установки для испытания строительных материалов.

На рис.1 представлена структурная схема установки для контроля строительных материалов, включающая индентор 1, который, разгоняясь под действием устройства разгона 3, может наносить удар по испытываемому материалу 8. К индентору прикреплен постоянный магнит 2, который при движении индентора наводит ЭДС в катушке индуктивности 4, прикрепленной к корпусу установки. Далее этот сигнал усиливается в усилителе 5 и через блок синхронизации 6 поступает в блок аналогового цифрового преобразования сигнала 7 (АЦП) и затем передается в устройство обработки сигнала для вычисления механических характеристик.

Исходной информацией о свойствах материала в предложенном методе является аналоговый сигнал, наводимый в катушке индуктивности. Величина этого сигнала пропорциональна текущей скорости перемещения индентора  $V(t)$  во время его контакта с материалом (рис. 2а).

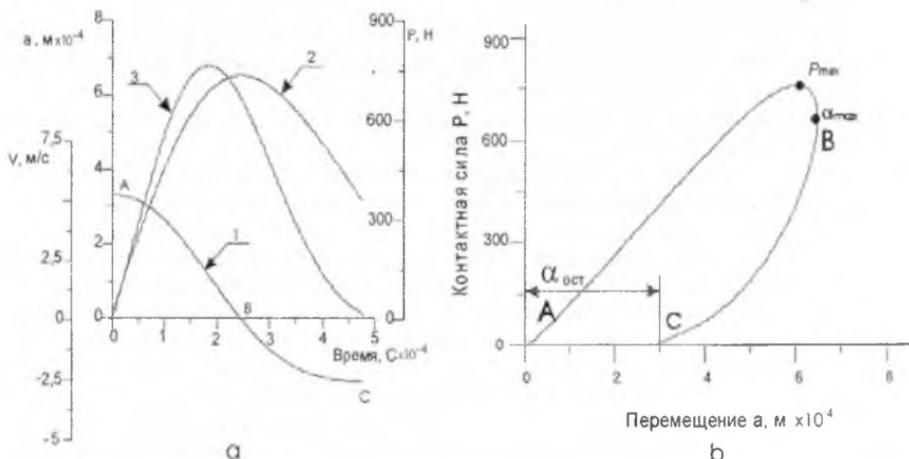


Рис. 2. Типичные кривые изменения скорости  $V(t)$  (кривая 1), глубины внедрения  $\alpha(t)$  (кривая 2) и контактной силы  $P(t)$  (кривая 3) индентора в процессе испытательного удара (а). Зависимость «контактная сила – перемещение» (b).

На этом рисунке точка А соответствует моменту касания индентором испытываемого материала, где скорость индентора равна  $V_0$ . Начиная с момента касания скорость индентора резко замедляется и в точке В становится равной нулю. Временной отрезок АВ соответствует длительности активного этапа удара  $\tau_a$ . После этого за счет восстановления упругих деформаций испытываемого материала индентор начинает обратное

движение, достигая скорости отскока, равной  $V_0^1$  в точке С. Отрезок ВС соответствует пассивному этапу удара. Дифференцирование скорости  $V(t)$  с последующим умножением на массу индентора  $m$  позволяет получить текущие значения контактного усилия  $P(t)$ , а интегрирование – значения перемещений  $\alpha(t)$ . Наиболее удобной для анализа характеристик материала является зависимость контактное усилие – глубина внедрения индентора  $P(\alpha)$ , представленная на рис. 2б, которую получают путем исключения времени как параметра из кривых  $P(t)$  и  $\alpha(t)$ . На рис. 2б окончание активного этапа удара, обозначенное точкой В, соответствует максимальной глубине внедрения индентора  $\alpha_{max}$ .

Из рис. 2б также следует, что за время удара не происходит полное восстановление отпечатка, образующегося при индентировании, т.е. по окончании пассивного этапа удара кривая  $P(\alpha)$  не приходит в начало координат, а отсекает на оси абсцисс отрезок АС. По его величине можно вычислить диаметр отпечатка [4], размер которого характеризует пластические свойства материала.

В соответствии с представленной схемой установки и возможностями метода была разработана конструкция ударного преобразователя (склерометра) (рис.3). Склерометр содержит: корпус, состоящий из направляющей трубки 1, внешней трубки 2 и внутреннего

стержня 3; боек 4 с закрепленными на нем наконечником 5 и постоянным магнитом 6, свободно перемещающийся в направляющей трубке 1; блок фиксации и спуска бойка 4, состоящий из подпружиненных зацепов 7, вращающихся относительно осей 8, толкателя 9, кнопки 10 и пружины 11; блок регистрации результатов измерения, состоящий из магнитоиндукционного датчика, включающего катушку индуктивности 12, установленную в нижней части направляющей трубки 1, и постоянный магнит 6, закрепленный на бойке 4, и схемы обработки сигнала 13; разгонную пружину сжатия 14 и возвратную пружину 15.

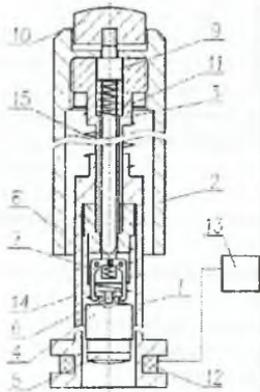


Рис. 3. Конструкция ударного преобразователя.

Во время удара в катушке индуктивности 12 магнитоиндукционного датчика наводится сигнал, зависящий от скорости перемещения постоянного магнита 6, который далее поступает на схему обработки сигнала 13. Этот сигнал после его обработки по заданным алгоритмам несет информацию о твердости, прочности, модуле упругости и других свойствах контролируемого материала.

Использование в блоке разгона бойка разгонной пружины сжатия, обеспечивающей свободный ход индентора при ударе, исключает влияние различных элементов устройства на процесс удара, что в сочетании с магнитоиндукционным

датчиком позволяет произвести точный расчет комплекса физико-механических характеристик материалов.

Представленный метод и конструкция склерометра, а также информация, которая получается при обработке сигнала (рис. 2), дает возможность, используя основные соотношения при ударе [5], связывающие коэффициент восстановления скорости  $e = V_0 / V_0^1$ , глубину внедрения индентора  $\alpha_{max}$ , контактное усилие  $P_{max}$  и другие параметры ударного взаимодействия, значительно снизить погрешность измерений. В тоже время наличие электронного блока прибора и микропроцессорной вычислительной техники позволяет производить расчет прочностных и упругих характеристик бетона, используя многопараметровый контроль. Разработанный прибор был опробован на образцах из бетона класса В. При этом в качестве величины, характеризующей прочность

бетона были взяты значения коэффициента  $K = f(P_{max}, \alpha_{max})$ , являющегося функцией модуля упругости и твердости бетона [5]. Соответствие оценок прочности бетона на сжатие  $R_{сж}$  методом динамического индентирования и испытаний на прессе показано на рис. 4.

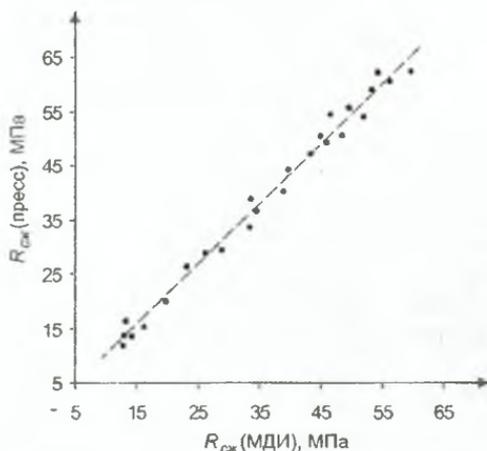


Рис. 4. Соответствие оценок прочности бетона на сжатие  $R_{сж}$  методом динамического индентирования (ДИ) и испытаний на прессе для образцов из бетона класса В.

Заключение:

- 1) проанализированы существующие методы неразрушающего контроля прочности бетона, показаны их недостатки и пути совершенствования;
- 2) предложен метод динамического индентирования для контроля бетона по параметрам ударного импульса;
- 3) показаны пути повышения точности и снижения погрешности при контроле;
- 4) разработана конструкция ударного преобразователя, позволяющая производить измерения при произвольной ориентации прибора в пространстве;
- 5) получена экспериментальная зависимость прочности от параметров ударного импульса.

#### Список литературы

1. ГОСТ 17624-87 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. М. Изд-во стандартов, 1989 — 24 с.
2. ГОСТ 22690-88 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. — М.: Изд-во стандартов, 1987.—19 с.
3. Джонс Р. Испытание бетона без разрушения. — М. Стройиздат, 1964 —139 с.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ.—М.: Мир, 1989.— 510 с.
5. Рудницкий В.А. Контроль физико-механических характеристик материалов и изделий по параметрам динамического контактного деформирования: Дисс. ...д-ра техн. наук: 05.11.13. —Минск, 1992. —370 с.