

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ МЕТОДОМ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ**  
*Determination of concrete strength by the dynamic  
indentation method*

Мацулевич О.В., Рудницкий В.А.  
*Matsulevich O.V., Rudnitsky V.A.*

В работе рассмотрены вопросы определения прочности бетона методом динамического индентирования. Проанализирована эффективность определения прочности по различным параметрам индентирования (максимальной глубине внедрения индентора, максимальному контактному усилию, длительности активного этапа удара, коэффициенту восстановления скорости индентора, динамической твердости) в диапазоне прочности (10–90) МПа. Установлено, что для всех перечисленных параметров с увеличением прочности наблюдается существенный рост разброса результатов отдельных серий. Предложена новая косвенная характеристика прочности бетона  $HR$ , позволяющий снизить погрешность определения прочности в диапазоне более 45 МПа. Разработана двухпараметровая методика контроля, позволяющая определять прочность с погрешностью не более 10% в диапазоне (10–40) и (60–90) МПа и не более 12% в диапазоне (40–60) МПа.

*This paper deals with the aspects of concrete strength determination by the dynamic indentation method. An effectiveness of strength determination as a function of different indentation parameters (maximum depth of indenter intrusion, maximum contact force, duration of impact active stage, restitution coefficient of indenter velocity, dynamic hardness) in the range (10-90) MPa is analyzed. It was found that for all of these parameters with the increase in strength an increase in the dispersion of results of individual series is observed. According with the research results a new characteristic of concrete strength and two-parameter testing technique is proposed. Using of this technique allows to determine the strength with an accuracy not more than 10% in the range (10-40) and (60-90) MPa and not more than 12% in the range (40-60) MPa.*

**Введение**

Склерометрические методы, основанные на определении прочности материала по его реакции на ударное внедрение жесткого индентора, получили широкое распространение в неразрушающем кон-

троле строительных материалов. Несмотря на то, что современные нормативные документы не рекомендуют применять неразрушающие методы без испытания кубов или кернов, остаются области, в которых склерометрические методы являются основными. В первую очередь к ним относятся ответственные густоармированные конструкции (например, мостовые сооружения), отбор кернов из которых не только затруднен наличием арматуры, но и приводит к снижению несущей способности конструкции.

Недостатком всех неразрушающих методов контроля прочности бетона является трудоемкость подготовки к испытаниям, связанная с необходимостью корректировки базовой градуировочной зависимости для каждого конкретного случая. Получение универсальной градуировочной зависимости или методики контроля с помощью известных методов и приборов, например, методов упругого отскока или ударного импульса, затруднительно. Используемые косвенные характеристики прочности подвержены влиянию многих факторов, не всегда имеющих однозначную связь с измеряемыми свойствами материала. Как следствие, одно и то же значение регистрируемого параметра может соответствовать различной прочности объекта, что приводит к снижению достоверности контроля.

В этой связи была поставлена задача провести исследования по выбору параметров динамического индентирования и физико-механических характеристик бетона, наиболее чувствительных к изменению прочности бетона во всем ее диапазоне, и получить градуировочные зависимости между выбранными параметрами и прочностью. Анализ таких зависимостей позволит рассмотреть возможность построения универсальной методики контроля, которая позволила бы отказаться от необходимости получения индивидуальных зависимостей.

### **Описание метода и аппаратуры**

Наиболее совершенной разновидностью склерометрических методов является метод динамического индентирования с непрерывной регистрацией процесса удара [1]. Метод развивается в лаборатории контактно-динамических методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси. Он заключается в нанесении локального удара жестким индентором по испытываемому материалу и регистрации всей кривой текущей скорости перемещения индентора, которая и представляет собой исходную информацию о материале. Скорость инден-

тора в каждый момент времени фиксируется с помощью магнитоиндукционного датчика.

Обработка полученного массива скорости индентора позволяет получить ряд параметров, характеризующих физико-механические свойства и состояние контролируемого материала. Основными параметрами индентирования являются: максимальное контактное усилие  $P_{\max}$ , максимальная глубина внедрения индентора  $\alpha_{\max}$ , длительность активного этапа удара  $t_a$ , коэффициент восстановления скорости  $e$  (отношение скорости отскока индентора к скорости его падения). На основании параметров  $P_{\max}$  и  $\alpha_{\max}$  с учетом диаметра сферического наконечника индентора  $D$  рассчитывается динамическая твердость  $HD$  – важная характеристика свойств материала:

$$HD = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_{\max}} . \quad (1)$$

Таким образом, метод динамического индентирования характеризуется более высокой информативностью измерений по сравнению с методами упругого отскока и ударного импульса. Перечисленные параметры могут использоваться как в качестве косвенных характеристик прочности бетона, так и для оценки его физико-механических свойств (например, модуля упругости [2]) согласно принятым моделям деформирования.

Применительно к испытаниям строительных материалов метод динамического индентирования с непрерывной регистрацией процесса удара реализован в портативном измерителе прочности ИПМ-1Б [2]. По сравнению с известными приборами, реализующими метод ударного импульса, измеритель прочности ИПМ-1Б имеет значительно более высокую энергию удара (1,4 Дж) и диаметр сферического наконечника индентора (32 мм). Это позволяет уменьшить неопределенность измерения, вызванную структурной неоднородностью бетона, а также влиянием поверхностного слоя.

Прибор ИПМ-1Б внесен в реестр средств измерений Республики Беларусь. Выпускается по ТУ ВУ 100289280.021 – 2010.

### **Эксперимент**

Чтобы исследовать эффективность использования различных параметров индентирования в качестве косвенной характеристики прочности, был проведен ряд экспериментов. Испытания проводились на специально изготовленных образцах-кубах (размерами

100x100x100 мм) 6-ти различных классов прочности (С16/20, С28/35, С32/40, С35/45, С40/50, С45/55) в диапазоне прочности на сжатие от 25,8 МПа до 75,8 МПа.

В таблице 3.1 приведены составы шести испытанных серий.

Таблица 3.1. Составы испытанных серий

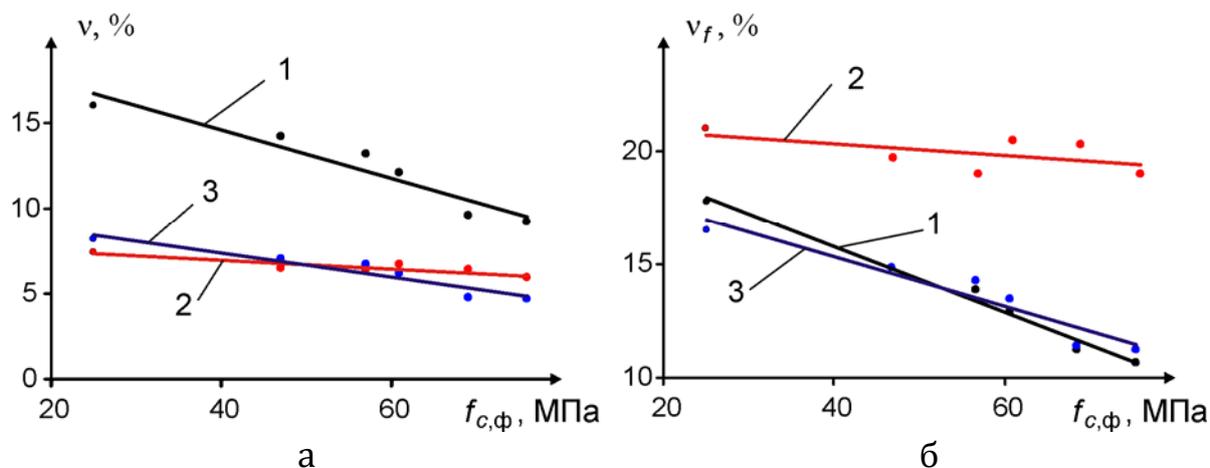
	Проектный класс прочности	Содержание компонентов бетонной смеси на один образец, г			
		Цемент	Вода	Щебень	Песок
Серия 1	С16/20	220	185	1240	780
Серия 2	С28/35	315	167	1240	715
Серия 3	С32/40	350	167	1240	715
Серия 4	С35/45	410	164	1240	660
Серия 5	С40/50	505	160	1240	610
Серия 6	С45/55	600	169	1240	515

Всего было испытано 20 образцов (по 4 образца в каждой серии). На каждом образце с помощью прибора ИПМ-1Б выполнялось 14 измерений (по 7 измерений на двух противоположных гранях образца), по которым рассчитывались средние значения параметров  $e$ ,  $t_a$ ,  $\alpha_{\max}$ ,  $P_{\max}$  и  $ND$ . Затем определялась фактическая прочность образцов на сжатие  $f_{c,ф}$ . Нагружение образцов проводилось по тем же граням, которые испытывались прибором ИПМ-1Б. По результатам разрушающих испытаний были построены градуировочные зависимости между прочностью  $f_{c,ф}$  и различными параметрами индентирования.

В качестве основной характеристики при анализе полученных зависимостей использовалась величина коэффициента вариации  $v_f$  значений прочности  $f_{c,н}$ , рассчитанных с помощью соответствующих зависимостей. Чтобы проанализировать источники  $v_f$ , для каждого параметра были также рассчитаны коэффициент вариации  $v$  и чувствительность к изменению прочности  $s$ . Чувствительность  $s$  определялась как величина относительного изменения параметра индентирования при изменении прочности бетона на 1 %.

Величина коэффициента вариации определялась как отношение стандартного отклонения значений прочности образцов  $f_{c,н}$  к их среднему значению. Условием использования стандартного отклонения является соответствие рассеивания измеренных значений нормальному распределению. Его проверка была выполнена в компьютерной программе SPSS с использованием теста Шапиро-Уилка [3]. Установлено, что для большинства (более 80 %) испытанных образцов величина  $p$  составляет более 0,5, что позволяет говорить о соответствии исследованных выборок нормальному распределению. Таким обра-

зом, использование стандартного отклонения для анализа полученных градуировочных зависимостей правомерно.



1 – динамическая твердость, 2 – коэффициент восстановления скорости, 3 – максимальное контактное усилие

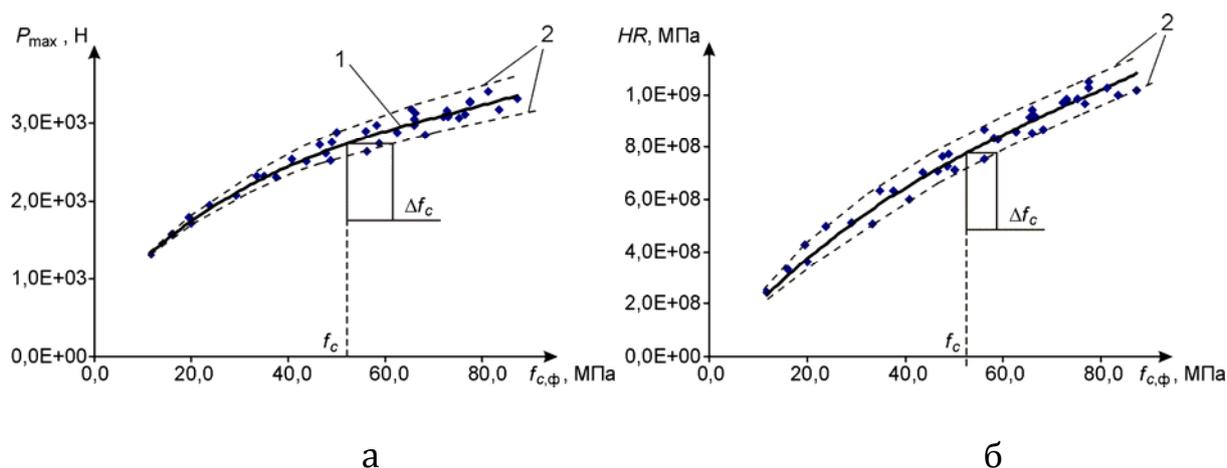
Рис. 1. Зависимости параметров  $v$  (а) и  $v_f$  (б) от прочности бетона

Зависимости  $v$  и  $v_f$  от прочности приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, наибольшие значения  $v_f$  получены при определении прочности по коэффициенту восстановления скорости. При этом разброс собственно коэффициента восстановления сравним с разбросом других параметров индентирования. Значительный разброс значений  $f_{c,H}$ , рассчитанных по коэффициенту восстановления, обусловлен его низкой чувствительностью к изменению прочности бетона, составляющей  $\sim 0,31\%$  во всем диапазоне. Это объясняется тем, что  $e$  увеличивается с увеличением твердости материала, но снижается с увеличением его модуля упругости. Поскольку и твердость, и модуль упругости растут с увеличением прочности бетона, коэффициент восстановления при этом изменяется незначительно. Таким образом, определение прочности бетона по коэффициенту восстановления скорости индентора, широко применяемому в качестве косвенной характеристики твердости металлов, неэффективно.

Эффективность использования длительности активного этапа удара, максимальной глубины внедрения и максимального контактного усилия в качестве косвенной характеристики прочности практически одинакова. Эти параметры имеют близкие значения как  $v$ , так и  $v_f$ , поэтому на рис. 1 в качестве примера показаны зависимости только для максимального контактного усилия. Чувствительность параметров  $P_{\max}$ ,  $\alpha_{\max}$  или  $t_a$  к изменению прочности снижается с ее увеличением от  $0,51\%$  до  $0,39\%$ .

Наибольший интерес представляет использование в качестве косвенной характеристики прочности бетона его динамической твердости  $HD$ . Особенностью твердости является высокая чувствительность ( $\sim 0,94\%$ ) к изменению прочности во всем ее диапазоне, обусловленная тем, что при увеличении сопротивления вдавливанию твердость увеличивается как вследствие уменьшения глубины внедрения, так и вследствие увеличения контактного усилия. С этим же связан и больший по сравнению с другими параметрами коэффициент вариации измеренных значений динамической твердости (рис. 1, а). В то же время, как видно из рис. 1, б, благодаря высокой чувствительности параметра  $HD$  к изменению прочности коэффициент вариации значений  $f_{c,H}$ , рассчитанных по параметрам  $HD$  и  $P_{\max}$ , практически одинаков.

Для уточнения полученных зависимостей и разработки методики определения прочности были проведены испытания бетонных образцов в широком диапазоне классов прочности. Было испытано 50 серий, общее количество образцов – 129, диапазон полученных значений прочности на сжатие – от 11,8 до 88,2 МПа. Испытаниям подвергались бетоны разных составов и возрастов, в том числе в возрасте менее 28 суток. Всего было проведено более 2000 измерений, при каждом из которых регистрировалась кривая внедрения и по результатам ее обработки определялись основные параметры индентирования ( $e$ ,  $t_a$ ,  $\alpha_{\max}$ ,  $P_{\max}$  и  $HD$ ). На основании экспериментальных данных для каждого параметра была построена градуировочная зависимость.



1 – градуировочная зависимость, 2 – границы рассеивания результатов испытаний отдельных серий образцов

Рис. 2. Зависимости параметров  $P_{\max}$  (а) и  $HR$  (б) от прочности бетона на сжатие

Чтобы сравнить полученные градуировочные зависимости, была проанализирована величина  $\delta f_c = \Delta f_c / f_c$  (рис. 2). Она характеризует рассеивание результатов измерений (для серий образцов) относительно рассматриваемой градуировочной зависимости и позволяет оценить возможность ее использования в качестве универсальной без необходимости корректировки под конкретный класс бетона.

Зависимость значений  $\delta f_{c,P_{max}}$ , рассчитанных по максимальному контактному усилию (рис. 2, а), от прочности показана на рисунке 3 (кривая 1).

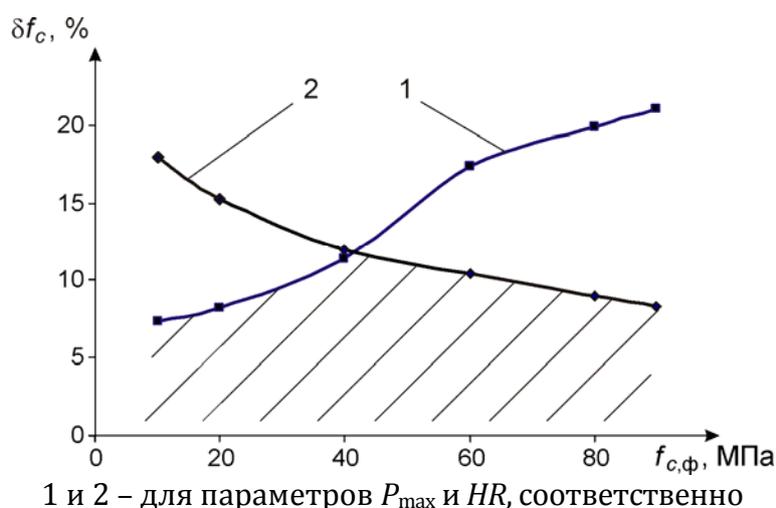


Рис. 3. Зависимости величины  $\delta f_c$  от прочности бетона на сжатие

Как видно из рис. 3, с увеличением прочности погрешность ее определения  $\delta f_{c,P_{max}}$  возрастает. Данный эффект в большей или меньшей степени проявляется и для других параметров индентирования: все они в диапазоне прочности выше (45–50) МПа характеризуются значительным разбросом результатов отдельных серий. В начале диапазона наименьшими значениями  $\delta f_c$  характеризуется показанная на рис. 2, а зависимость максимального контактного усилия.

Наиболее вероятным источником рассеивания является неоднозначная связь упругих и прочностных свойств бетона, проявляющаяся в том, что при одной и той же прочности модуль упругости может отличаться для бетонов разных составов и технологий. Об этом свидетельствует зависимость между прочностью и динамическим модулем упругости, рассчитанным для испытанных серий по методике, описанной в работе [2]. Величина  $\delta f_c$  для динамического модуля упругости в 1,5–2 раза превышает величину  $\delta f_c$  для рассмотренных параметров индентирования во всем диапазоне прочности. Поскольку упругие свойства материала оказывают существенное влияние на параметры

индентирования, изменяющийся модуль упругости может значительно искажать соотношение между параметрами индентирования и прочностью бетона.

Таким образом, для повышения достоверности контроля наряду с косвенными характеристиками, отражающими как прочностные, так и упругие свойства бетона, необходимо учитывать параметры, зависящие в большей степени от его упругих свойств. Т.е. методика контроля должна включать использование как минимум двух параметров индентирования. Первый – для расчета прочности, а второй – для компенсации изменения первого, вызванного влиянием упругости материала.

Проведенные исследования показали, что указанным требованиям наиболее соответствуют динамическая твердость и коэффициент восстановления скорости. Предложена новая характеристика прочности бетона  $HR$ , рассчитываемая по следующей зависимости:

$$HR = \frac{HD}{e^n}, \quad (2)$$

где  $n$  – параметр, зависящий от условий нагружения (диаметра индентора  $D$  и энергии удара  $W$ ). Для прибора ИПМ-1Б ( $D = 32$  мм,  $W = 1,4$  Дж) коэффициент  $n$  по данным эксперимента составил 0,75.

На рисунках 2, б и 3 (кривая 2) показаны зависимости от прочности бетона параметра  $HR$  и величины  $\delta f_{c,HR}$ . Как видно из рис. 3, в противоположность максимальному контактному усилию  $P_{\max}$  и другим рассмотренным ранее параметрам индентирования величина  $\delta f_{c,HR}$  с увеличением прочности уменьшается. Кривые 1 и 2 пересекаются в точке с прочностью 42 МПа. Таким образом, используя два параметра –  $P_{\max}$  и  $HR$ , можно охватить весь диапазон прочности с погрешностью, соответствующей заштрихованной на рис. 3 области. Погрешность превышает 10% только в диапазоне 40-60 МПа, где имеет максимальное значение 12%.

Предлагаемая методика контроля заключается в анализе двух значений прочности бетона –  $f_{c,P_{\max}}$  (по контактному усилию) и  $\delta f_{c,HR}$  (по параметру  $HR$ ) – и выборе одного из них по следующему критерию. Если значение  $f_{c,P_{\max}} \leq 42$  МПа, то оно принимается в качестве результата измерения прочности, если  $f_{c,P_{\max}} > 42$  МПа, то в качестве результата измерения принимается значение  $f_{c,HR}$ .

Предложенная методика позволяет определять прочность бетона с погрешностью (10–12) %. Таким образом, погрешность измере-

ния прочности, обеспечиваемая прибором ИПМ-1Б, при значительно меньшей трудоемкости подготовки к контролю соизмерима с погрешностью, обеспечиваемой аналогами, предполагающими использование индивидуальных градуировочных зависимостей.

### **Заключение**

По результатам проведенных экспериментов проанализирована эффективность определения прочности по различным параметрам индентирования. Установлено, что для всех рассмотренных параметров с увеличением прочности наблюдается существенный рост разброса результатов отдельных серий. Предложена новая косвенная характеристика прочности бетона  $HR$ , позволяющая учесть влияние упругих свойств бетона на результат измерения, и за счет этого снизить погрешность определения прочности в диапазоне более 45 МПа. Разработана двухпараметровая методика контроля, позволяющая определять прочность с погрешностью не более 10% в диапазоне (10-40) и (60-90) МПа и не более 12% в диапазоне (40-60) МПа.

### **Литература**

1. Рудницкий, В.А., Рабцевич А.В. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов – Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86.
2. Мацулевич, О.В., Рудницкий, В.А., Литвиновский, Д.А. Определение модуля упругости бетона методом динамического индентирования. – Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 4. – С. 46-56.
3. Дубнов, П.Ю. Обработка статистической информации с помощью SPSS. М.: ООО «Издательство АСТ», 2004. – 221 с.

*Статья поступила в редакцию 06.06.13*