

01; 05.1; 12

© 1993

## К ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

В.С. Куксенко, А.И. Слуккер,  
И.Э. Школьник

Динамической прочностью ( $\zeta_d$ ) принято называть значение напряжения, при котором происходит разрушение тела в условиях, когда скорость нарастания напряжения ( $\frac{d\zeta}{dt} = \dot{\zeta}$ ) достаточно велика. Динамическая прочность такого широко распространенного конструкционного материала, каким является бетон, выступает важной характеристикой бетона, требующейся при многих инженерных расчетах. Прямое экспериментальное определение  $\zeta_d$  для бетона может выполняться при использовании сложного специального оборудования. В то же время определение „статической прочности“ бетона ( $\zeta_c$ ) – напряжения разрушения при сравнительно медленном нагружении (малой скорости нарастания нагрузки  $\dot{\zeta}$ ), является значительно более простым и доступным.

Поэтому значительный практический интерес представляет разработка физически обоснованного метода оценки динамической прочности по результатам статических (вернее – квазистатических) измерений прочности бетона, т.е. нахождения связи между  $\zeta_d$  и  $\zeta_c$ .

Подход к решению этой задачи может быть основан на учете кинетической природы разрушения, т.е. на том обстоятельстве, что разрушение тела под нагрузкой не есть критический акт, а является результатом процесса зарождения, накопления и развития элементов поврежденности тела (трещин прежде всего, а также и других дефектов) [1–3]. При этом, как широко показано в [1], данный процесс на атомно-молекулярном уровне управляется актами термофлуктуационного разрыва напряженных межатомных связей.

В результате для не слишком малых напряжений ( $\zeta$ ) и температур ( $T$ ) установлена общая зависимость времени от момента приложения постоянного напряжения  $\zeta$  до разрушения тела – долговечности тела  $\tau$  [1]:

$$\tau \approx \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \zeta}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $U_0$  – исходная энергия диссоциации межатомных связей,  $\tau_0 \approx 10^{-13}$  с (близко к периоду колебаний атомов),  $k$  – постоянная Больцмана,  $\gamma$  – коэффициент, включающий активационный объем и показатель локальных перенапряжений.

Если прилагаемое напряжение изменяется во времени ( $t$ ), т.е.  $\sigma = \sigma(t)$ , то на основе принципа суммирования поврежденности выполняется условие (условие Бейли) [4]:

$$\int_0^{t_p} \frac{dT}{\tau[\sigma(t), T]} = 1, \quad (2)$$

где  $t_p$  - время до разрушения.

Для простейшего случая роста напряжения с постоянной скоростью  $\dot{\sigma}$  получаем [1]:

$$\sigma_p \approx \frac{1}{\gamma} \left[ U_0 + kT \ln \left( \tau_0 \frac{\dot{\sigma}}{kT} \right) \right] + \frac{kT}{\gamma} \ln \dot{\sigma}, \quad (3)$$

где  $\sigma_p = \dot{\sigma} t_p$  - значение напряжения к моменту разрушения  $t_p$ , т.е.  $\sigma_p$  - разрывное напряжение. При больших  $\dot{\sigma}$   $\sigma_p$  - динамическая прочность  $\sigma_d$ . При малых  $\dot{\sigma}$   $\sigma_p$  - статическая (квазистатическая) прочность

Из выражения (3) видно, что  $\sigma_p$  есть приблизительно линейная функция  $\ln \dot{\sigma}$ , причем с ростом  $\dot{\sigma}$   $\sigma_p$  возрастает, т.е. динамическая прочность оказывается более высокой, чем статическая. Такое состояние является хорошо известным фактом для многих материалов, а на основе кинетической теории разрушения, как видно из излагаемого, приобретает обоснованное физическое объяснение.

Для данного вещества  $U_0$  и  $\tau_0$  можно считать постоянными.  $\gamma$  определяется дефектностью и структурой и для данного вещества (в зависимости от обработки материала) может меняться в пределах примерно одного десятичного порядка [1].

Поэтому в выражении (3) для данного вещества и заданной температуры  $T$  член  $\left[ U_0 + kT \ln \left( \tau_0 \frac{\dot{\sigma}}{kT} \right) \right]$  является практически постоянным (поскольку слабой, логарифмической зависимостью от  $\dot{\sigma}$  можно пренебречь).

Тогда график зависимости  $\sigma_p(\ln \dot{\sigma})$  при постоянной температуре для данного вещества ( $U_0 = \text{const}$ ), но для разных структурно-дефектных состояний этого вещества (разные значения  $\gamma$ ) имеет вид, показанный на рис. 1.

График имеет вид веера, выходящего из полюса на оси абсцисс. Положение полюса, т.е. значение экстраполяционной скорости нагружения, отвечающей „нулевой прочности“ ( $\dot{\sigma}_0$ ), определяется из условия в выражении (3)  $\sigma_p = 0$ .

Получаем:

$$\ln \dot{\sigma}_0 = - \left[ \frac{U_0}{kT} + \ln \left( \tau_0 \frac{\dot{\sigma}}{kT} \right) \right]. \quad (4)$$

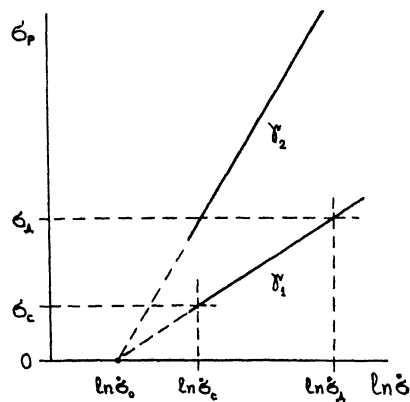


Рис. 1. Схема зависимости разрушающего напряжения от скорости нарастания напряжения для материала с разным уровнем статической прочности ( $\sigma_c$ ). Температура постоянная.  $\gamma_1 > \gamma_2$ .

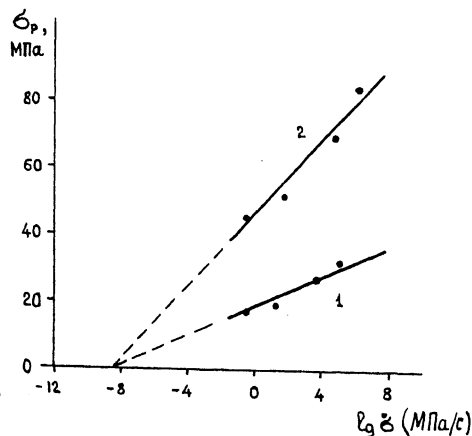


Рис. 2. Зависимость разрушающего напряжения от скорости нарастания напряжения для бетона с разным уровнем статической прочности ( $\sigma_c$ ): 1 -  $\sigma_c = 17.5$  МПа, 2 -  $\sigma_c = 45.5$  МПа (по данным из [3]). Температура комнатная.

Тогда выражение (3) преобразуется в форму:

$$\sigma_p \propto \frac{kT}{r} \ln \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_0}. \quad (5)$$

Из (3) легко получить выражение для связи динамической прочности  $\sigma_A$  при высокой скорости нагружения  $\dot{\sigma}_A$  со статической прочностью  $\sigma_c$  при малой скорости нагружения  $\dot{\sigma}_c$  (при одинаковой температуре T).

Действительно:

$$\sigma_A \propto \frac{kT}{r} \ln \left( \frac{\dot{\sigma}_A}{\dot{\sigma}_0} \right); \quad \sigma_c \propto \frac{kT}{r} \ln \left( \frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_0} \right). \quad (6)$$

Тогда:

$$\sigma_A \propto \sigma_c \cdot \ln \left( \frac{\dot{\sigma}_A}{\dot{\sigma}_0} \right) / \ln \left( \frac{\dot{\sigma}_c}{\dot{\sigma}_0} \right).$$

Таким образом, динамическая прочность материала может быть определена, если известна его статическая прочность (при одном и том же виде нагружения: растяжении, сжатии изгибе и т.д.). Значение  $\ln \dot{\epsilon}_0$  может быть оценено по выражению (4). Для этого надо знать энергию диссоциации межатомных связей в данном веществе ( $U_0$ ).  $\tau_0$  - принимается  $\sim 10^{-13}$  с. Значение  $\frac{r}{kT}$  лежит в области  $\sim (0.1-1) \text{ МПа}^{-1}$ , что отвечает значениям коэффициента  $r \approx (0.4-4) \text{ нм}^3$  - характерным фактически для всех материалов [1]. Вариация значений  $r$ , как уже отмечалось выше, слабо влияет на значение  $\ln \dot{\epsilon}_0$ .

Проверим приложимость изложенного метода оценки динамической прочности именно к бетону. Для этого используем данные о прочности на сжатие образцов бетона с двумя уровнями прочности [3]. Скорость нагружения варьировалась в диапазоне  $\sim 5-6$  десятичных порядков. Температура - комнатная. Результаты измерения зависимости прочности бетонов от скорости нагружения представлены на рис. 2.

Можно видеть, что графики экспериментальных зависимостей  $\sigma_p(\lg \dot{\epsilon})$  в достаточной мере близки теоретическим зависимостям (рис. 1). Имеют место близкие к линейным зависимости  $\sigma_p(\lg \dot{\epsilon})$  для обоих бетонов, и при этом такие зависимости достаточно непринужденно экстраполируются в полюс на оси абсцисс. Таким образом, наблюдается качественное соответствие экспериментальных результатов расчетным данным.

Обратимся к количественному анализу данных. В соответствии с (3), наклоны зависимостей  $\sigma_p(\ln \dot{\epsilon})$ :

$$\frac{\Delta \sigma_p}{\Delta(\ln \dot{\epsilon})} = \frac{kT}{r}.$$

Из рис. 2 получаем для 1:  $\frac{r}{kT} \approx 1.05 \text{ МПа}^{-1}$ , для 2:  $\frac{r}{kT} \approx 0.43 \text{ МПа}^{-1}$ , т.е. значение  $\frac{r}{kT}$  для данных бетонов действительно лежит в диапазоне, названном выше.

Полюс на рис. 2 отвечает значению  $\lg \dot{\epsilon}_0 = -8.5$  ( $\dot{\epsilon}_0$  - в МПа/с). Используя выражение (4) и найденные по экспериментальным данным значения  $\lg \dot{\epsilon}_0$  и  $\frac{r}{kT}$ , производим оценку  $U_0$ :  $U_0 \approx \approx 120 \text{ кДж/моль}$   $1.3 \text{ эВ}$ . Полученное значение  $U_0$  представляется не случайным. Оно является близким энергии диссоциации Si-O связей при гидролитическом воздействии [5]. Такое совпадение свидетельствует о том, что разрушение бетона идет по общим кинетическим закономерностям, когда процесс разрушения контролируется термофлуктуационным распадом напряженных межатомных связей. Это обосновывает определение динамической прочности бетона по его статической прочности, используя выражение (6). На рис. 2 нагружение с наименьшими скоростями ( $\dot{\epsilon} \approx 0.3 \text{ МПа/с}$ )

можно считать статическим (квазистатическим), а нагружение с наибольшими скоростями ( $\dot{\epsilon} \approx 10^5 - 10^6$  МПа/с) является динамическим, ударным.

Как следует из формулы (6) и графиков на рис. 2, для нахождения динамической прочности бетона, действительно, достаточно определить лишь одно значение статической прочности, а затем по нему и по значению  $\ln \dot{\epsilon}_0$  (полус), либо аналитически по формуле (6), либо по графику типа рис. 2 определяется  $\sigma_d$  для задаваемой  $\dot{\epsilon}_d$ . Точность определения  $\sigma_d$  в соответствии с разбросом точек на рис. 2 можно оценить величиной в  $\sim 10\%$ .

Рассмотренный метод нахождения  $\sigma_d$  для бетона основан на общих положениях теории разрушения и дает принципиальную возможность оценки  $\sigma_d$ .

В то же время данный метод, как представляется, может быть существенно улучшен и уточнен.

Действительно, основные выражения (3) и (5) выведены при допущении о постоянстве во времени коэффициента  $\mu$ . В реальности же этот коэффициент может и должен меняться со временем действия нагрузки (постоянной или переменной) на тело, поскольку коэффициент  $\mu$  связан с дефектностью объекта, а процесс разрушения и заключается в развитии дефектности нагруженного тела. Одним из способов оценки дефектности такого объекта, как бетон, и контроля изменения дефектности (поврежденности), является ультразвуковое зондирование [6]. При этом учет связи скорости звука с характеристиками дефектности, а отсюда – и с коэффициентом  $\mu$  и его изменением во времени позволит получить более точные выражения для прогноза динамической прочности. Возможно, необходимость в проведении статических испытаний будет ослаблена или совсем исключена, так как ультразвуковое зондирование дает основания для определения статической прочности или начального коэффициента  $\mu$  неразрушающим методом [7].

Разработка более детализированного и надежного метода оценки динамической прочности бетона (как и других материалов) является задачей дальнейших исследований.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Р е г е л ь В.Р., С л у ц к е р А.И., Т о м а ш е в с к и й Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [2] К у к с е н к о В.С. Сб. Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986. С. 35–39.
- [3] Ш к о л ь н и к И.Э., Д о л г о п о л о в Н.Н. // Строительные материалы. 1987. № 11. С. 27–29.
- [4] V a i l y Y. // Glass Industry. 1939. V. 20. P. 21–37.
- [5] Ш к о л ь н и к И.Э. // Техническая акустика. 1992. Т. 1. В. 2. С. 62–63.

- [6] S h k o l n i k I.E. // Proc. of 13-th Word Conf. on Non-Destructive Testing. Brazil, 1992. V. 2. P. 1092-1096.

Поступило в Редакцию  
4 февраля 1993 г.