

©1994

КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

В.И.Бетехтин, В.С.Куксенко, А.И.Слуцкер, И.Э.Школьник

На примерах по измерению долговечности бетона и цементного камня при статическом нагружении (растяжение, сжатие) и по измерению зависимости разрывного напряжения от скорости нагружения показано, что разрушение бетона (цементного камня) есть кинетическое явление. Кинетика разрушения контролируется термофлуктуационными разрывами кремний-кислородных мостиков в сухих (обезвоженных) образцах и разрывами гидролизованых кремний-кислородных связей во влагосодержащих образцах. Установлено соотношение между динамической прочностью (при высоких скоростях нагружения) бетонов и квазистатической прочностью (при малых скоростях нагружения).

Прочность бетона или его основного компонента — цементного камня — является предметом интенсивных исследований материаловедов, механиков, физиков, что определяется важнейшим значением бетона в строительстве. Одной из актуальных проблем для бетона выступает прогнозирование прочности и работоспособности конструкций из этого материала.

Бетон отличается весьма сложным химическим составом и чрезвычайной гетерогенностью строения, включающего в себя элементы кристаллической, квазиаморфной и поровой структуры, свободной и связанной воды. Это, естественно, осложняет физический анализ его свойств и поведения. Могут возникнуть вопросы о возможности применения к бетону фундаментальных положений физики разрушения (физики прочности), развиваемых при физических исследованиях более простых твердых тел.

В настоящей работе ставились следующие задачи: рассмотреть возможность применения к бетону (цементному камню) современных физических представлений о кинетике разрушения твердых тел, провести физический анализ динамического разрушения бетона, установить связь прочностных характеристик бетона при динамическом и статическом нагружении, предложить физически обоснованные методы оценки динамической прочности бетона по результатам квазистатических измерений прочности.

1. Статическая долговечность бетона

Как известно [1-3], разрушение очень многих твердых тел (ионных и ковалентных кристаллов, металлов, сплавов, стекол, полимеров, керамики, композиционных материалов и др.) выступает не как критическое

событие, а как кинетическое явление. Т.е. макроскопический разрыв нагруженного тела подготавливается процессом, развивающимся в теле от момента приложения нагрузки, и сам разрыв является завершающим актом этого процесса. Интегральной характеристикой этого процесса является договечность τ — время от момента приложения нагрузки до разрыва тела. Наиболее простым для анализа случаев является условие, когда напряжение σ на протяжении долговечности поддерживается постоянным. В этих условиях для широкого круга материалов в большом диапазоне (но не слишком малых и не слишком больших значений) напряжений и температур T получено общее выражение для долговечности [1]

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

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$ s, U_0 совпадает с энергией диссоциации межатомных связей, γ включает в себя активационный объем и коэффициент локальных перенапряжений (следствие структурной неоднородности материала).

Фундаментальная форма выражения (1) вида фактора Больцмана, близость τ_0 периоду межатомных колебаний, идентификация начального барьера U_0 , снижаемого приложенным напряжением σ , позволили охарактеризовать кинетику разрушения как процесс, контролируемый термофлуктуационным распадом напряженных межатомных связей в нагруженном теле.

Проявляется ли для бетона кинетический характер разрушения и выполняются ли и для него отмеченные фундаментальные закономерности кинетики разрушения?

Систематические исследования, направленные на выяснение этих вопросов, описаны в [3-7]. Исследования проводились на образцах цементного камня и бетонов в условиях одноосного растяжения, сжатия и изгиба.

Чтобы определить роль влаги в разрушении цементного камня и бетона, измерения проводились как на тщательно высушенных образцах и при высоких температурах, так и на влагонасыщенных образцах при комнатной температуре. Типичные результаты измерения долговечности τ при различных значениях растягивающего напряжения σ представлены на рис. 1, а, б.

Видно, что во всех случаях договечность имеет конечные значения (варьируемые в диапазоне примерно 5 десятичных порядков) и при каждой постоянной температуре долговечность резко (экспоненциально) снижается с ростом напряжения. Подобные данные получены и для бетона [3,7]. Уже эти данные показывают, что разрушение цементного камня и бетона выступает не как критическое, а как кинетическое явление. Действительно, конечные значения долговечности означают, что после приложения нагрузки развивается процесс, приводящий к макроразрушению. Этот факт включает цементный камень и бетон в общий широкий круг материалов, демонстрирующих кинетический характер разрушения.

Соответствует ли кинетический характер разрушения бетона общим положениям кинетической физики разрушения и в функционально-количественном отношении? Т.е. описывается ли зависимость долговечности бетона от температуры и напряжения выражением (1)? Для

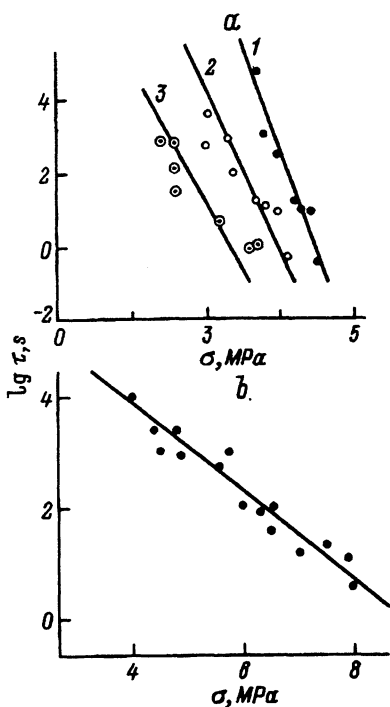


Рис. 1. Долговечность цементного камня при растягивающем нагружении [5].

a — высушен (прокален) при 873 К. Температура испытаний (К): 1 — 473, 2 — 673, 3 — 873; *b* — влагонасыщенный. Температура испытаний комнатная.

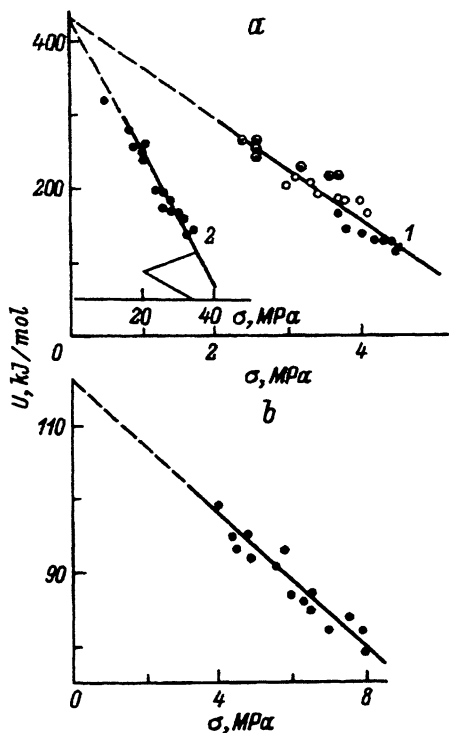


Рис. 2. Энергия активации разрушения цементного камня и бетона.

a — для «сухого» цементного камня по данным рис. 1, *a* (обозначения точек те же, что и на рис. 1, *a*) (1) и для «сухого» тяжелого бетона при сжатии [7] (2); *b* — для влагонасыщенного цементного камня по данным рис. 1, *b*.

выяснения этого вопроса данные рис. 1, *a*, *b* в соответствии с выражением (1) перестраивались в координатах $U(\sigma) = 2.3kT \lg(\tau/\tau_0)$, где для τ_0 использовалось фундаментальное значение 10^{-13} с. Результаты перестроения всех экспериментальных точек на графиках рис. 1 показаны на рис. 2, *a*, *b*. На рис. 2, *a* зависимость 2 представляет собой подобный же пересчет для данных по измерению долговечности «сухого» бетона при сжимающем напряжении [7].

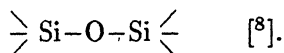
Можно видеть, что для «сухого» цементного камня (рис. 2, *a*, зависимость 1) получено достаточно компактное группирование точек, относящихся к разным температурам, вдоль прямой линии. Это означает достаточно хорошее соответствие экспериментальных данных выражению (1). Графики на рис. 2, *a* могут быть описаны зависимостями типа $U(\sigma) = U_0 - \gamma\sigma$. Из рис. 2, *a* путем линейной экстраполяции графиков к $\sigma = 0$ получено значение U_0 начальной величины барьера, контролирующего кинетику разрушения цементного камня и бетона (табл. 1). Видно, что значения U_0 для сухих цементного камня (растяжение) и бетона (сжатие) практически совпадают, составляя 420–430 кДж/мол. Подобная

	U_0		Энергия диссоциации D		γ , nm ³	$q = \frac{\gamma}{V_a}$
	kJ/mol	eV	kJ/mol	eV		
Цементный камень «сухой», растяжение	430	4.7	450*	4.9*	105	10 ⁴
Бетон «сухой», сжатие	430	4.7			15	10 ³
Цементный камень влажносодержащий, растяжение	115	1.25	105–125**	1.15–1.35**	7	10 ³

* Энергия диссоциации по реакции $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiO} + \text{O}$ [8].

** Энергия диссоциации при гидролитическом распаде $\text{Si}-\text{O}$ [10].

устойчивость значений U_0 получена для ряда марок бетона в обезвоженном состоянии [7]. Это свидетельствует о фундаментальном смысле величины U_0 как характеристики межатомного взаимодействия, которая определяется только ближним порядком в расположении атомов. Величина U_0 хорошо совпадает с энергией диссоциации $\text{Si}-\text{O}$ связи в кремний-кислородном мостике



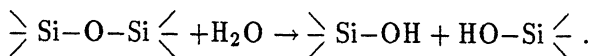
Поскольку в составе цемента (бетона) содержится большая концентрация групп SiO_2 (25% и более), то можно заключить, что кинетика разрушения «сухих» цементного камня и бетона контролируется разрывами напряженных кремний-кислородных мостиков. Именно эти акты лежат, очевидно, в основе развития микротрещин и пор, которые являются типичными дефектами структуры цементного камня и бетона.

Из данных рис. 2,а можно оценить и величину локальных перенапряжений на распадающихся мостиках. В соответствии с трактовкой коэффициента γ [1] $\gamma = qV_a$, где V_a — активационный объем в элементарном акте распада, q — коэффициент перенапряжения, по значению γ (из наклона графика рис. 2,а) и $V_a \approx 10^{-2} \text{ nm}^3$ (характерное значение активационного объема в атомных перегруппировках) получаем $q \approx 10^3 \div 10^4$ (табл. 1). Такое высокое значение коэффициента локальных перенапряжений, очевидно, связано с резко гетерогенной структурой цементного камня, насыщенной трещинами, порами [3,9]. На стыках элементов структуры, на краях трещин с учетом повышенной жесткости (хрупкости) «сухого» камня и должны возникать высокие локальные напряжения при низком среднем напряжении нагруженных образцов.

Для влагонасыщенного цементного камня имеет место аналогичная линейная зависимость барьера разрушения от напряжения (рис. 2,б).

Количественные же характеристики зависимости $U(\sigma) = U_0 - \gamma\sigma$ здесь иные, чем при разрушении под растягивающим напряжением «сухого» цементного камня (табл. 1). Как видно, величина U_0 для влагонасыщенного цементного камня существенно меньше. Этот результат хорошо согласуется с представлением о резком снижении энергии

диссоциации Si-O связей при гидролитическом воздействии [10] по реакции



Известно, что реакция гидролиза ускоряется внешним напряжением и может идти при комнатной температуре. Согласно имеющимся данным [10], барьер гидролитического распада кремний-кислородных мостиков имеет величину около $120 \text{ kJ/mol} \approx 1.3 \text{ eV}$.

Коэффициент γ в этом случае также отличается (табл. 1). Здесь при растяжении коэффициент локальных перенапряжений $q = \gamma/V_a \approx 10^3$ (значение активационного объема V_a принято таким же, как и для «сухого» камня, хотя оно может и несколько отличается). Но во всяком случае коэффициент перенапряжений для влагонасыщенного камня, разрушающегося при растяжении, примерно на порядок ниже, чем для «сухого». Это, возможно, связано с уменьшением «упругого контраста» на границах пор за счет присутствия воды в порах цементного камня.

Таким образом, результаты исследования поведения цементного камня и бетона под действием статических постоянных напряжений (растягивающее напряжение, сжатие) демонстрируют проявление кинетического характера разрушения: наличие долговечности и ее зависимости от напряжения и температуры. Зависимости $\tau(\sigma, T)$ имеют вид, общий для кинетики разрушения твердых тел (формула (1)). Это означает, что подготовка цемента и бетона к разрушению определяется термофлуктуационной кинетикой разрывов перенапряженных межатомных связей, конкретно — кремний-кислородных связей.

Такое заключение позволяет подойти к физически обоснованному анализу и динамической прочности бетонов.

2. Динамическая прочность бетона

Динамической прочностью σ_d принято называть значение напряжения, при котором происходит разрушение тела в условиях, когда скорость нарастания напряжения $d\sigma/dt = \dot{\sigma}$ достаточно велика.

Динамическая прочность бетона является весьма важной технической характеристикой этого материала. Прямое экспериментальное определение σ_d для бетона требует использования сложного специального оборудования. В то же время определение квазистатической прочности σ_s — напряжения разрушения при сравнительно медленном нагружении (невысокой скорости нарастания нагрузки $\dot{\sigma}$) — является значительно более простым и доступным.

Поэтому значительный практический интерес представляет разработка физически обоснованного метода оценки динамической прочности по результатам квазистатических измерений прочности бетона, т.е. нахождение связи между σ_d и σ_s . Установленная выше кинетическая природа разрушения бетона (цементного камня) позволяет найти эту связь.

Подход к решению этой задачи основан на простом и естественном соображении о том, что во время подготовки нагруженного тела к разрушению происходит накопление повреждений. Это соображение опирается на многочисленные данные о процессах в нагруженных телах [1-3]. Если прикладываемое напряжение изменяется во времени t , т.е.

$\sigma = \sigma(t)$, то принцип суммирования повреждений приводит к условию Бейли [11] — критерию разрушения тела

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

где t_r — время до разрушения. Смысл выражения (2) в том, что суммируются «парциальные долговечности» — относительные доли долговечности при разных значениях σ , что отвечает суммированию повреждений, набирающихся при разных напряжениях.

Для простейшего случая роста напряжения с постоянной скоростью $\dot{\sigma}$ и для зависимости $\tau(\sigma, T)$ в виде выражения (1) получаем

$$\dot{\sigma} t_r = \frac{kT}{\gamma} \ln \left[\frac{\gamma \dot{\sigma} \tau_0}{kT} \exp \left(\frac{U_0}{kT} \right) + 1 \right]. \quad (3)$$

В весьма широком диапазоне реальных значений U_0 , γ , T и при $\dot{\sigma} > \sim 10^{-7}$ МПа/с (т.е. не предельно малая скорость нагружения)

$$\frac{\gamma \dot{\sigma} \tau_0}{kT} \exp \left(\frac{U_0}{kT} \right) \gg 1.$$

Тогда

$$\sigma_r \simeq \frac{1}{\gamma} \left[U_0 + kT \ln \left(\tau_0 \frac{\gamma}{kT} \right) \right] + \frac{kT}{\gamma} \ln \dot{\sigma}, \quad (4)$$

где $\sigma_r = \dot{\sigma} t_r$ — значение напряжения к моменту разрушения t_r , т.е. σ_r — разрывное напряжение. При больших $\dot{\sigma}$ σ_r — динамическая прочность σ_d , при малых $\dot{\sigma}$ σ_r — квазистатическая прочность σ_s .

Из выражения (4) видно, что σ_r есть приблизительно линейная функция $\ln \dot{\sigma}$, причем с ростом $\dot{\sigma}$ σ_r возрастает, т.е. динамическая

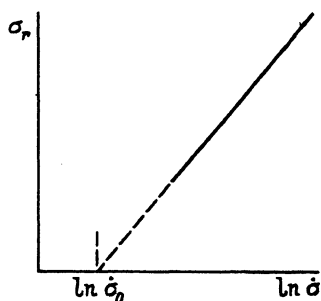


Рис. 3. Схема зависимости разрушающего напряжения от скорости нагружения.

График отвечает выражению (4) при постоянных значениях U_0 , γ , τ_0 , T .

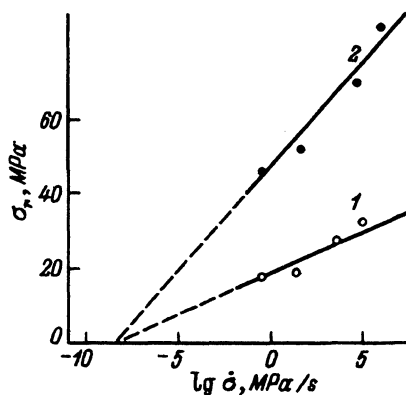


Рис. 4. Зависимость разрывной прочности бетона от скорости нагружения. Сжатие. Температура комнатная. По данным [12, с. 82].

1, 2 — разные значения статической прочности.

прочность оказывается более высокой, чем квазистатическая. Такое соотношение прочностей является хорошо известным фактом для многих материалов, а на основе кинетических представлений о разрушении этот факт приобретает физическое объяснение.

Схематически соответствующий выражению (4) вид зависимости $\sigma_r(\ln \dot{\sigma})$ при температуре T и характеристиках данного материала U_0 и γ (коэффициент τ_0 для всех твердых тел с логарифмической точностью одинаков, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с [1]) показан на рис. 3.

Из (4) следует, что наклон графика

$$\frac{\Delta \sigma_r}{\Delta(\ln \dot{\sigma})} = \frac{kT}{\gamma} \quad (5)$$

связан только с коэффициентом γ .

Линейная экстраполяция зависимости $\sigma_r(\ln \dot{\sigma})$ к $\sigma_r = 0$ приводит к некоторой величине $\ln \dot{\sigma}_0$ (рис. 3). Разумеется, значение $\dot{\sigma}_0$ не отвечает реальному падению прочности до нуля, а является следствием приближенности соотношения (4) — перехода от (3) к (4).

В то же время эта экстраполяционная величина $\ln \dot{\sigma}_0$ оказывается полезной для последующего анализа. Действительно, в соответствии с (4)

$$\ln \dot{\sigma}_0 = - \left[\frac{U_0}{kT} + \ln \left(\tau_0 \frac{\gamma}{kT} \right) \right]. \quad (6)$$

Видно, что величина $\ln \dot{\sigma}_0$ существенным образом определяется параметром U_0 — начальной энергией активации разрушения материала. Зависимость $\ln \dot{\sigma}_0$ от коэффициента γ логарифмическая, т.е. слабая. После определения коэффициента γ из наклона графика $\sigma_r(\ln \dot{\sigma})$ можно найти U_0 по значению $\ln \dot{\sigma}_0$.

Согласуются ли имеющиеся экспериментальные данные по динамической прочности бетонов с закономерностями, вытекающими из кинетического характера разрушения? Для выяснения этого вопроса используем ряд данных [3,12] по разрушению бетонов при сжатии и изгибе

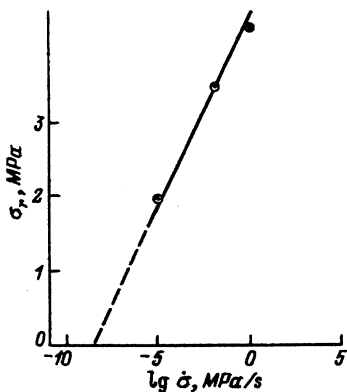


Рис. 5. Зависимость разрывной прочности бетона от скорости нагружения. Изгиб. Температура комнатная. По данным [12, с. 88].

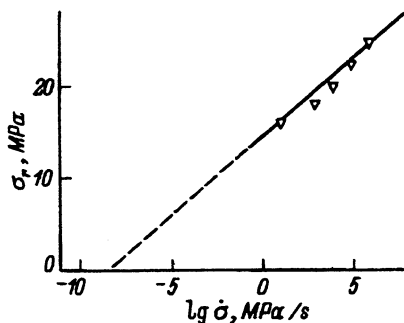


Рис. 6. Зависимость разрывной прочности бетона от скорости нагружения. Сжатие. Температура комнатная. По данным [12, с. 85].

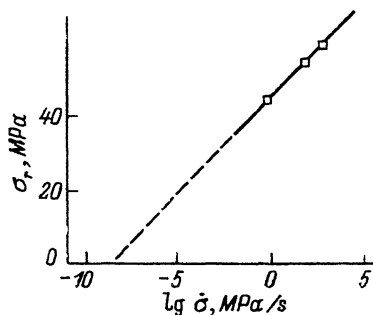


Рис. 7. Зависимость разрывной прочности бетона от скорости нагружения. Сжатие. Температура комнатная. По данным [12, с. 83].

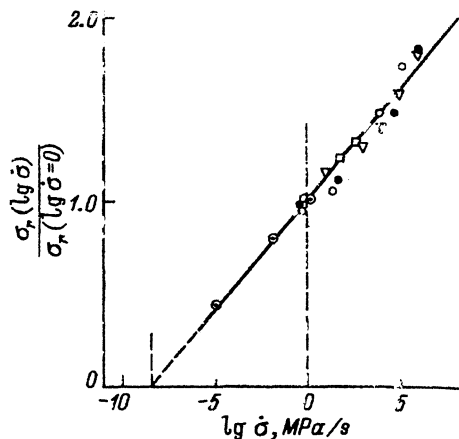


Рис. 8. Приведенная зависимость динамической прочности бетонов от скорости нагружения. Приведение к прочности при $\lg \dot{\sigma} = 0$ ($\dot{\sigma}$ — в МПа/с). Обозначения точек те же, что и на рис. 4-7.

в условиях вариации скорости нагружения в диапазоне 5-6 десятичных порядков. Результаты измерения зависимостей $\sigma_r(\lg \dot{\sigma})$ (все — при комнатной температуре) показаны на рис. 4-7.

Видно, что во всех случаях графики зависимостей $\sigma_r(\lg \dot{\sigma})$ единообразны: с достаточно хорошим приближением они имеют линейный характер, что означает их подобие схеме на рис. 3 и, следовательно, соответствие выражению (4).

Обратим внимание на то обстоятельство, что линейная экстраполяция графиков на рис. 4-7 к значению $\sigma_r = 0$ приводит примерно к одинаковому значению $\lg \dot{\sigma}_0 \approx -(8 \div 9)$ ($\dot{\sigma}$ — в МПа/с).

Сделанные заключения об общем характере зависимости $\sigma_r(\lg \dot{\sigma}_0)$ для различных бетонов и условий нагружения (линейность зависимости и экстраполяция к близкому значению $\lg \dot{\sigma}$) подтверждаются совмещением данных рис. 4-7. Перестроим данные рис. 4-7 в координаты

$$\frac{\sigma_r(\lg \dot{\sigma})}{\sigma_r(\lg \dot{\sigma} = 0)} - \lg \dot{\sigma},$$

т.е. прономируем их на значение $\sigma_r(\lg \dot{\sigma} = 0)$ (можно нормировать на любое значение $\sigma_r(\lg \dot{\sigma})$). Результаты такой нормировки показаны на рис. 8, где для каждого случая экспериментальные данные (точки) представлены теми же значками, что и на рис. 4-7. Можно видеть, что имеет место хорошее линейное совмещение всех данных. Общий диапазон изменения скорости нагружения $\dot{\sigma}$ достиг при этом десяти порядков (десятичных). Экстраполяционное значение $\lg \dot{\sigma}$ при $\sigma_r = 0$, отвечающее $\lg \dot{\sigma}_0$ на схеме рис. 3, выявилось достаточно надежно и составляло $\lg \dot{\sigma}_0 \approx -8.5$.

Обратимся к количественному анализу данных рис. 4-7 и 8. По наклонам графиков на рис. 4-7, пользуясь соотношением (5), находим значения коэффициентов γ . Эти значения сведены в табл. 2. Видно,

Данные по бетонам	γ, nm^3	$q = \frac{\gamma}{V_a}$	U_0	
			kJ/mol	eV
Из рис. 4	1.8	$2 \cdot 10^2$	127	1.32
	4.3	$4 \cdot 10^2$	124	1.29
Из рис. 5	18.3	$2 \cdot 10^3$	121	1.26
Из рис. 6	5.9	$6 \cdot 10^2$	123	1.28
Из рис. 7	1.8	$2 \cdot 10^2$	127	1.32
Среднее значение			124 ± 2	1.29 ± 0.02

что значения γ варьируют в диапазоне примерно одного десятичного порядка, но лежат в той же области значений, что и при статическом разрушении влагонасыщенного цементного камня (табл. 1). То же можно сказать и о коэффициенте перенапряжения ($q = \gamma/V_a$, где V_a берется, как и раньше, равным 10^{-2} nm^3 ; табл. 2). Значения q лежат в диапазоне $\sim 0^2 \div 10^3$.

Пользуясь экстраполяционным значением $\lg \dot{\sigma}_0 = -8.5$ ($\dot{\sigma}_0$ — в МПа/с) и найденными значениями коэффициента γ , по соотношению (6) мы определили значения U_0 , которые также сведены в табл. 2. Видно, что значения U_0 варьируют весьма слабо: 121–127 кДж/моль или 1.26–1.32 eV. Это соответствует отмеченной выше слабой (логарифмической) зависимости $\lg \dot{\sigma}_0$ от γ . Таким образом, для ряда разных случаев разрушения бетона (разные виды бетона, разные виды нагружения, просто — разные исследователи в разных странах) определяется устойчивое значение начального барьера разрушения $U_0 = 1.29 \pm 0.02 \text{ eV}$. Такой вывод на основе анализа и других данных был сделан в [3]. Как следует из табл. 1, такое значение U_0 близко к начальному барьеру разрушения влагонасыщенного цементного камня и соответственно к энергии диссоциации кремний-кислородных связей по гидrolитическому механизму. Это означает, что в обычных неосущенных бетонах содержится достаточное количество свободной воды, чтобы их разрушение контролировалось именно гидrolитическим распадом напряженных Si-O связей.

Результаты анализа динамического разрушения бетонов находятся в хорошем согласии с данными по статической долговечности влагонасыщенного цементного камня. Закономерности динамического разрушения бетона отвечают общим кинетическим представлениям о разрушении как о процессе накопления повреждений, контролируемом термофлуктуационным распадом перенапряженных межатомных связей.

Такое заключение ведет к возможности достаточно простой и надежной оценки динамической прочности бетона σ_d (при больших скоростях нагружения $\dot{\sigma}_d$) по результатам измерения квазистатической прочности σ_s (при невысоких скоростях нагружения $\dot{\sigma}_s$) [13,14].

Действительно, общее выражение (4) с учетом (6) преобразуется в форму

$$\sigma_r \approx \frac{kT}{\gamma} \ln(\dot{\sigma}/\dot{\sigma}_0).$$

Тогда

$$\sigma_d \approx \frac{kT}{\gamma} \ln(\dot{\sigma}_d/\dot{\sigma}_0), \quad \sigma_s \approx \frac{kT}{\gamma} \ln(\dot{\sigma}_s/\dot{\sigma}_0).$$

Отсюда при одинаковой температуре T следует

$$\sigma_d \approx \sigma_s \ln \left(\frac{\dot{\sigma}_d}{\dot{\sigma}_0} \right) / \ln \left(\frac{\dot{\sigma}_s}{\dot{\sigma}_0} \right).$$

Следовательно, динамическая прочность бетона σ_d может быть определена, если известна его квазистатическая прочность σ_s при соответствующем виде нагружения: растяжении, сжатии, изгиба и т.д. Значение $\dot{\sigma}_0$, как установлено выше, можно считать для бетона практически постоянной величиной ($\lg \dot{\sigma}_0 = -8.5$ при $\dot{\sigma}$ в МПа/с). Точность определения σ_d в соответствии с разбросом точек на рис. 4–8 можно оценить величиной $\sim 10\%$.

Таким образом, столь сложный по составу и структуре конструкционный материал, каким является бетон, при различных видах и режимах нагружения демонстрирует полное соответствие общим представлениям о разрушении как о кинетическом явлении. Последовательный и физически обоснованный учет кинетического характера разрушения ведет к возможности оценки и прогнозирования динамической прочности бетона.

Список литературы

- [1] Регель В.Р., Слудкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [2] Куксенко В.С. // Сб. «Физика прочности и пластичности». Л.: Наука, 1986. 384 с.
- [3] Школьник И.Э. Диагностика качества бетона: новые аспекты. М., Технопроект, 1993. 326 с.
- [4] Бахтибаев А.Н., Бетехтин В.И., Кадырбеков А.Д., Регель В.Р. Сб. трудов Всесоюз. семинара по физике прочности композиционных материалов. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1978. С. 146–152.
- [5] Бахтибаев А.Н., Бетехтин В.И., Кадырбеков А.Д., Регель В.Р. // Физика прочности композиционных материалов. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1979. С. 112–117.
- [6] Бетехтин В.И., Ройтман В.М. и др. // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 11. С. 61–65.
- [7] Бахтибаев А.Н. // Автореф. докт. дис. Л., ЛПИ, 1992.
- [8] Веденев В.И., Гурвич Л.В., Кондратьев В.И. и др. Энергии разрыва химических связей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 216 с.
- [9] Бетехтин В.И., Бахтибаев А.Н., Егоров Е.А., Жиженков В.В. и др. // Цемент. 1989. № 10. С. 8–10.
- [10] Берштейн В.А. Механолиитические процессы и прочность твердых тел. Л.: Наука, 1987. 320 с.
- [11] Bailey J. // Glass Industry. 1939. V. 20. P. 21–37.
- [12] Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Изд-во литературы по строительству, 1970. 272 с.
- [13] Школьник И.Э., Долгполов Н.Н. // Строительные материалы. 1987. № 11. С. 27–29.
- [14] Школьник И.Э., Ягунд Г.К., Рыков Г.В. // Бетон и железобетон. 1992. № 2. С. 23–24.