

МЕХАНИКА СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОНА РАЗРУШЕНИЮ

В.И. МАЙОРОВ, *д-р техн. наук, профессор*
Российский университет дружбы народов, Москва

Исследована механика разрушения бетона на разных стадиях напряжённо-деформированного состояния и масштабах разрушения структуры в условии простого осевого сжатия, растяжения и растяжения при изгибе.

Структура бетона

Бетон – искусственный конгломерат, состоящий из зёрен заполнителя и связующей цементно-песчаной матрицы (**ЦПМ**). С заполнителем, образующим жёсткий остов структуры, связаны упругие характеристики бетона, с **ЦПМ** – природа неупругих деформаций.

Особенностью структуры бетона является физическая и геометрическая неоднородность её элементов. Показателем геометрической неоднородности служит различие уровней масштабов размеров составляющих: от суб- и микроскопического (размерность блоков кристаллов цементного камня, 10^{-3} мм) до макро- и мегаскопического (мелкий и крупный заполнитель, мм). На мегаскопическом уровне текстура бетона считается однородной, если соблюдается условие [3]:

$$d_{\max} \leq \frac{h_{\min}}{n}, \quad (1)$$

где $d_{\max}$ – максимальный размер фракции крупного заполнителя; $h_{\min}$ – минимальный размер рабочего сечения; n – показатель кратности, $n \geq 5$.

Основной физической характеристикой структуры бетона является плотность упаковки зёрен заполнителя (**P**), от которой зависят прочность, деформативность (соотношение упругих и неупругих компонент деформации) и трещиностойкость бетона. Некоторые сведения о схемах упаковки зёрен в форме шара в элементарных кубических объёмах приведены в таблице 1 [9].

Таблица 1

Характеристики	Схема упаковки		
	простая	объёмно-центрированная	плотноупакованная
Число контактов	6	8	12
Расстояние от центра одного зерна до края соседнего зерна в долях ребра куба (a)	0,5 a	0,43 a	0,35 a
Плотность упаковки, $P = (\pi d^3)/a^3$	0,52	0,64	0,79

Наиболее близкой к бетону по показателю плотности, числу контактов, расстоянию между зёрнами заполнителя является простая схема, рис. 1, a .

В результате уплотнения зёрна заполнителя под действием веса и вибрации стремятся занять положение устойчивого равновесия на минимальном энергетическом уровне гравитационного поля, когда каждое зерно соприкасается с соседним на расстоянии радиуса.

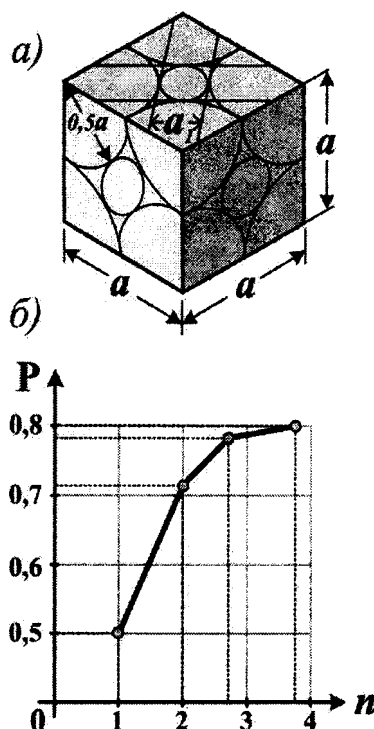


Рис. 1. Схема упаковки зерен бетона

а) простая схема; б) график зависимости плотности упаковки от числа членов ряда n

структуры в целом, в том числе выраженную в реакциях взаимодействия её составляющих на макроскопическом уровне, включая разрушение.

Исследование пластических деформаций и микроразрывов сплошности бетона

Установлено [6], что разрушение структуры бетона на субмикроскопическом уровне происходит с самого начала нагружения. Причиной является наличие первичных концентраторов внутренних напряжений в зонах местных дефектов структуры в виде микрополостей, возникших вследствие физико-химических процессов твердения цементного камня.

В зависимости от ориентации микрополостей по отношению к главному вектору внешней силы одна их часть под действием напряжений сжатия смыкается, увеличивая плотность структуры, при этом другая, ортогонально-ориентированная, под действием напряжений растяжения увеличивается в объёме, приводя к разрыхлению структуры. Если внешние усилия направлены по касательной к полости дефекта, то деформации развиваются по дислокационной модели скольжения.

В отличие от металлов, в которых деформации сдвига по плоскостям меж-

При наличии межзернового контакта объём, занимаемый зёрнами заполнителя V_z в элементарной кубической ячейке со стороной $a = d_{max}$ удовлетворяющей условию (1), можно выразить суммой ряда:

$$V_z = 0,523a_0^3 \left[1 + \sum_1^{n-1} (k^3 \cdot m)^{n-1} \right], \quad (2)$$

где a - базовый максимальный диаметр зёрен; n - порядковый номер фракции в зерновом составе; k - коэффициент, характеризующий градиент изменения зернового состава, $k = d_{n-1} / d_n$; m - число пустот в элементарном объёме (в случае простой упаковки $k = 0,4$; $m = 6$).

Очевидно (рис. 1, б), что для формирования несущего остова структуры достаточно первых 2-х-3-х членов ряда (2). Фракции размером менее 2 мм (песок) входят в состав цементно-песчаной матрицы.

Зёрна заполнителя и ЦПМ являются главными элементами структуры, разрушение или достижение предельного состояния которых означает предельное состояние или разрушение структуры в целом. В силу этого исследование механики бетона по масштабу можно разделить на 2 части:

- 1) Исследование напряжённо-деформированного состояния (НДС) и разрушения ЦПМ на начальных суб- и микроскопическом уровнях;
- 2) Исследование сопротивления разрушению

зерновых контактов сопровождаются замещениями дислокаций и, как следствие, повышением предела текучести и упрочнением, в бетоне пластические деформации приводят к перераспределению упругих напряжений на границах полостей, провоцируя микроскопические разрывы сплошности в направлении нормальном к плоскости скольжения.

При разгрузке, в силу вязко-упругого последействия, происходит частичное смыкание микрополостей и стабилизация равновесного состояния зон концентраторов напряжений в начальной точке диаграммы « $\sigma - \epsilon$ ».

Движение трещин носит мгновенный характер высвобождения накопленной потенциальной энергии упругих деформаций. Необходимым условием изучения быстропотекающих процессов является регистрация во времени происходящих изменений исследуемых параметров со скоростью, сопоставимой скорости движения трещин.

На рис.2 приведены осциллограммы записей продольных и поперечных деформаций бетона при испытании призм на ударное сжатие. На появление микротрещин указывает резкий скачок графика деформаций датчика № 6. Одновременно замедляются и останавливаются приращения графиков смежных датчиков № 1 и № 5, что свидетельствует о разгрузке напряжений в области боковых поверхностей разрыва.

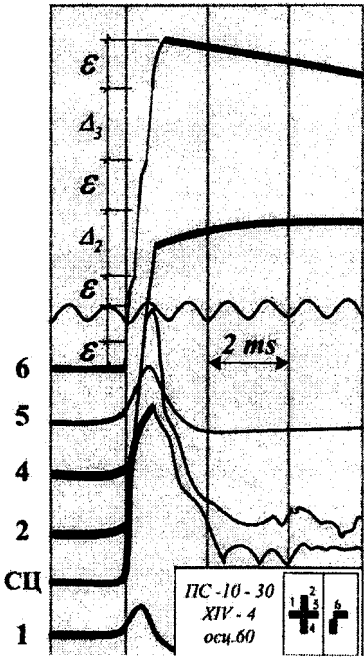


Рис. 2. Осциллограммы записи деформаций бетона при осевом сжатии (время нагружения $t_n = 10^{-3}$ с; скорость деформации $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-1}$ отн.ед.с⁻¹)

Величина предельной относительной деформации при образовании микроразрыва $[\epsilon_{м.р.}] = 5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед.

В своём развитии микротрещина скачками проходит через ряд последовательно равновесных состояний.

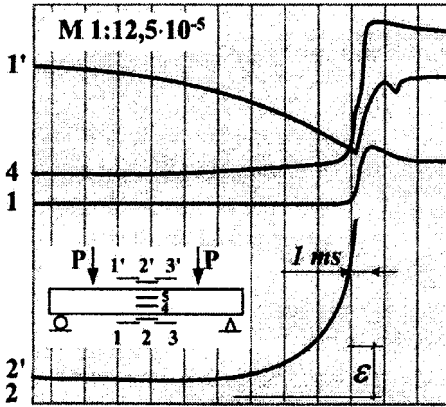


Рис.3. Осциллограммы записи деформаций в нормальном сечении зоны чистого изгиба: $t_n = 2 \cdot 10^{-2}$ с; $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-2}$ отн.ед.с⁻¹

Шаг скачка, отнесённый к базе измерений, характеризует ширину раскрытия трещины. В начальный момент ширина раскрытия микротрещины, равная $a_{м.т.} = (1 - 5) \text{ мм}^3$, находится за пределом разрешающей возможности глаза ($5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$). По мере роста напряжений ширина раскрытия увеличивается, трещина становится видимой. Представленный механизм трещинообразования распространяется на случаи простого одноосного растяжения и растяжения при изгибе, рис.3. Средняя скорость движения трещины, замеренная по моментам последовательного разрыва датчиков по высоте сечения (графики 3, 4 рис.4) составила $100\text{-}120 \text{ мс}^{-1}$.

Общая картина поля деформаций в вершине стационарной трещины представлена фотографией полос интерференции в оптически активном покрытии, нанесённом на поверхность железобетонной балки в зоне чистого изгиба, рис.4.

Наблюдаемая локальная концентрация полос интерференции вокруг вершины трещины определяет границы области, внутри которой деформации развиваются по упруго-пластическому закону, испытывая давление со стороны окружающего упругого поля.

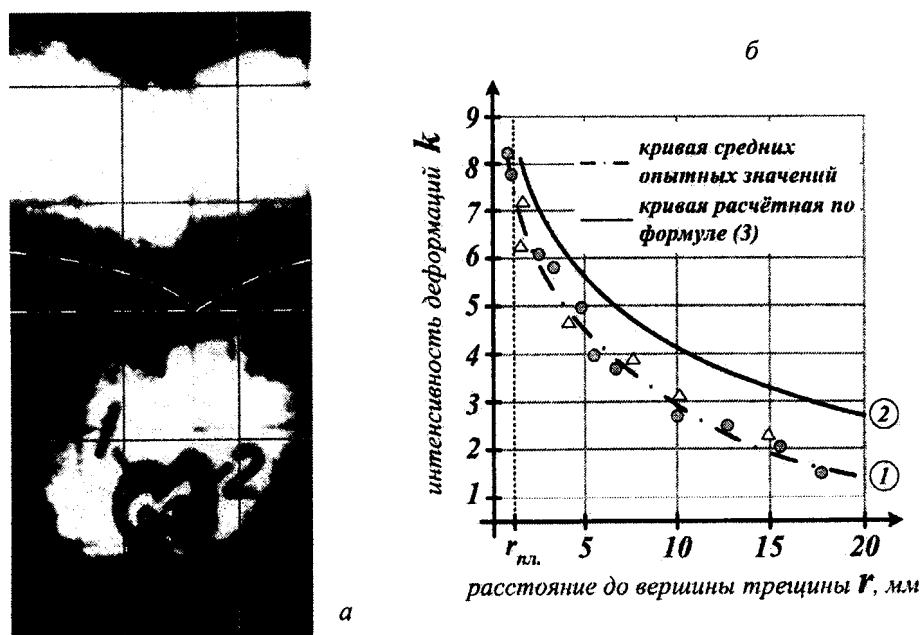


Рис. 4. Распределение деформаций в зоне чистого изгиба после образования трещины

а) фотография полос интерференции (оптическая постоянная покрытия по деформациям $\epsilon_{оп.} = 48 \cdot 10^{-5}$ отн.ед.); б) зависимость интенсивности деформаций (k) от расстояния до вершины трещины (r)

Интенсивность упруго-пластических деформаций уменьшается по мере увеличения расстояния (r) от вершины трещины. Непосредственно к вершине трещины примыкает зона местных «пиковых» напряжений радиусом $r_{пл.} = 1,5\text{-}2 \text{ мм}$, внутри которой материал течёт, следуя законам гидродинамики, преодолевая вязкое сопротивление и силы молекулярного взаимодействия по поверхностям скольжения блоков кристаллов цементного камня.

В условии соизмеримости размеров пластической зоны с размерами фракции мелкого заполнителя $d < 2$ мм, песок не может оказать значительного сопротивления на пути движения трещины. Этим объясняются неудачи в создании высокопрочных мелкозернистых бетонов и их повышенная деформативность. При разгрузке пластические деформации, сосредоточенные в вершине трещины, препятствуют смыканию полостей разрыва. Тем самым внося свой вклад в единый процесс образования неупругих деформаций как результат упруго-хрупкого разрыва сплошности и пластического течения в вершинах микротрещин. Что не противоречит официальному определению термина «пластические», как остаточные деформации микроразрыва сплошности без макроразрушений и нарушения равновесного состояния структуры.¹

На рис. 4, б приведены опытные (по порядку полос гр. 1) и расчетные (гр. 2) изменения интенсивности деформаций в зависимости от расстояния r . График 2 построен по формуле Д. Ирвина на основе линейно-упругой модели образования трещин в крупно-зернистых структурах металлов [5]:

$$r = \frac{1}{\pi} \left(\frac{k}{\sigma} \right)^2, \quad (3)$$

где k – коэффициент интенсивности деформаций, $k = \varepsilon_r / \varepsilon_{mr}$; σ – напряжения на границе упруго-пластической зоны, $\sigma = \nu E_n \varepsilon_{mr}$; ν – коэффициент упругопластичности. Близкое совпадение графиков 1, 2 свидетельствует о едином механизме трещинообразования в кристаллических зерновых структурах металлов и цементного камня. Принципиальным отличием является зависимость критической длины равновесной трещины от плотности упаковки зёрен. Сохранение линейности диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » после образования микротрещины обеспечивается не столько за счёт прорастания и раскрытия трещины, сколько за счёт интенсивности новых трещинообразований в объёме ЦПМ. Для нарушения равновесного состояния потребуется дополнительное внешнее усилие, способное преодолеть концентрацию напряжений в вершине микротрещины. Максимальная величина коэффициента концентрации напряжений в наших опытах оставалась практически неизменной ($k = 8-10$) не зависимо от длины трещины.

Очевидно, что после прорыва микротрещины, её остановка возможна только при встрече с преградой, энергоёмкость разрушения которой значительно превышает сопротивление разрушению цементного камня в зоне k . Такой преградой являются зёрна крупного заполнителя, образующие замкнутое межзерновое пространство. Разрыв сплошности ЦПМ приводит к утрате непрерывности распределения напряжений по поверхности заполнителя. В каждом элементарном объёме образуется не менее шести зон межзерновых контактов. Несущая система структуры переходит в состояние предразрушения, когда ее прочность и устойчивость напрямую зависит от ее архитектуры, количества зерновых контактов, их ориентации относительно главного вектора действующих сил.

Механика разрушения. Прочность бетона

Процесс разрушения бетона состоит в последовательном разрыве сплошно-

¹ Рекомендации комитета АН СССР по технической терминологии.

сти, начиная с нижних ступеней иерархии структуры с последующим объединений отдельных микротрещин в объемных ЦПМ и их прорывом в обход или по зернам заполнителя с превращением в магистральные трещины разрыва. Возможны 2 случая разрушения бетона: по цементно-песчаной матрице в обход зёрен заполнителя и от поперечного разрыва по зёрнам заполнителя. Разрушение разрывом менее энергоёмко и происходит с большей скоростью, чем от сдвига.

Построение расчётной модели, адекватно отражающей НДС бетона на разных уровнях напряжения и масштабах разрушения, требует, помимо уравнений состояния механики континуума, привлечения решений теории дискретных сред, энергетических уравнений статистической теории прочности, учитывающих вероятностную природу конгломератных материалов.

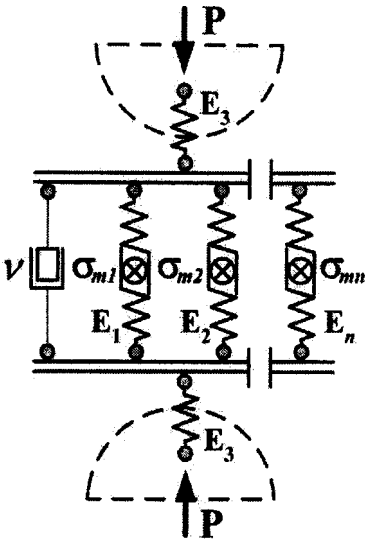


Рис.5. Многоступенчатая модель структуры бетона

Для аналитического описания диаграмм работы материалов с точками перелома графиков « $\sigma - \epsilon$ » могут быть применены кусочно-линейные соотношения теории ползучести, выраженные в дифференциальной или интегральной форме [8].²

Многоступенчатая модель структуры бетона (рис.5) исследована автором [7]. Экспериментально установлено, что для адекватного отображения реальной диаграммы работы число уравнений может быть ограничено тремя: соответственно начальной упруго-вязкой стадии ($\sigma < \sigma_{mt}$), стадии образования микроразрывов сплошности ($\sigma > \sigma_{mt} = \epsilon_{mt} E_1$) и стадии макро-разрушений ($\sigma > \sigma_p = \epsilon_p E_2$).

Вместе с тем, практическому использованию кусочно-линейных зависимостей препятствует большая трудоёмкость интегрирования. В этом отношении применение эне-

ргетических уравнений статистической теории прочности позволяет получить зависимость « $\sigma - \epsilon$ » в виде простых формул, доступных при инженерных расчётах. Условие прочности в энергетической форме запишем в виде:

$$\int_0^{\epsilon_y} \sigma_y \cdot d\epsilon_y + \int_0^{\epsilon_{nl}} \sigma_y \cdot d\epsilon_{nl} - \int_0^{\epsilon} \sigma_r \cdot d\epsilon_r = \int_0^{\epsilon} \sigma_p \cdot d\epsilon \quad (4)$$

В правой части (4) – работа внешней силы P на пути общей деформации ϵ ; в левой – работа внутреннего сопротивления разрушению: 1-ый интеграл – потенциальная энергия упругого сопротивления; 2-ой – затраты энергии на пути неупругих пластических деформаций; 3-ий – часть упругой энергии, высвободившейся при поперечных разрывах сплошности.

Выразим значения напряжений σ_y , σ_r через начальный модуль упругости

² Скачкообразное уменьшение при этом модуля деформации E и рост скорости деформации $\dot{\epsilon}$ – естественны.

E_n , коэффициент Пуассона μ_y и общую деформацию ε , используя известные соотношения:

$$\sigma_y = \varepsilon_y \cdot E_n; \quad \sigma_r = k \cdot \mu_y \cdot \varepsilon_y \cdot E_n; \quad \varepsilon_y = \varepsilon \cdot \lambda; \quad \varepsilon_{ny} = \varepsilon \cdot (1 - \lambda); \quad \varepsilon_r = \mu_y \cdot \varepsilon \cdot (\xi_r - 1), \quad (5)$$

где λ – коэффициент упругопластичности ($\lambda = \varepsilon_y / \varepsilon$) зависит от плотности упаковки заполнителя, изменяется в пределах 0,5–0,85; ξ_r – коэффициент интенсивности разрушения сплошности, $\xi_r = \mu / \mu_y$; μ – коэффициент поперечных деформаций, изменяется в пределах 0,14–0,5.

Проведя подстановку (5) в (4) после интегрирования (4) получим условие прочности бетона в виде:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_n [\lambda \cdot (1 - 0,5\lambda) - k \mu_y^2 \lambda \cdot (\xi_r - 1)] \geq [R] \quad (6)$$

$[R]$ – предел прочности, равный напряжению в экстремальной точке графика « σ – ε » при $d\sigma/d\varepsilon = 0$, за которой начинается разрушение бетона с полным высвобождением упруго-накопленной потенциальной энергии. Процесс носит динамический характер, требующий соблюдения мер защиты при проведении испытаний. Установлено [6], что величина предельной деформации в экстремальной точке графика « σ – ε » является константой и составляет $\varepsilon_p = 200 \cdot 10^{-5}$ отн.ед., независимо от прочности бетона и времени нагружения.

Несмотря на простоту (6), адекватно отражает физическую природу и механику разрушения на всех уровнях масштаба структуры тяжёлых бетонов при простом одноосном сжатии. Учитывая, что макроскопические напряжения зависят только от упругих деформаций, условие (6) может быть распространено на сложные напряжения, используя зависимости упругих составляющих $\varepsilon_{1,2,3}$ от напряжений $\sigma_{1,2,3}$ в форме обобщённого закона Гука.

Л и т е р а т у р а

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчётные модели силового сопротивления железобетона. – М.: АСВ, 2004. – С.138.
2. Волков С.Д. Единая статистическая теория прочности твёрдых тел// Журнал технической физики. – 1954. – том XXIV, вып.12. – С.2250–2260.
3. Дидух Б.И. Упругопластическое сопротивление грунтов. – М.: Изд-во УДН, 1987. – С.8–9.
4. Ильющин А.А., Ленский В.С. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1959.
5. Ирвин Д. Особенности динамического разрушения (в кн.: Механика разрушения). – М.: МИР, 1981. – С.9–22.
6. Майоров В.И. Экспериментальная основа и элементы теории прочности бетона// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2003. – №1. – С.29–39.
7. Майоров В.И. Аналитическое описание диаграммы работы конструктивных конгломератных материалов кусочно-линейными соотношениями теории ползучести// Архитектура оболочек и прочностной расчёт тонкостенных строительных и машиностроительных конструкций сложной формы: Труды международной научной конференции. – М.: РУДН, 2001. – С.225–227.
8. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: 1968. – С.240–294.
9. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твёрдого тела. – М.: МИР, 1969. – С.35.

DESTRUCTION RESISTANCE MECHANICS OF CONCRETE

V.I. Mayorov