



УДК 624.046.5

**Ф.Х. Ахметзянов** – кандидат технических наук, доцент

Тел.: (843) 510-47-05

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОНА, ПРЕДПОСЫЛКИ ОЦЕНКИ ЕГО ОСТАТОЧНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ БЕТОНА ПРИ ОТСУТСТВИИ И НАЛИЧИИ АРМИРОВАНИЯ С ПРОСТЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ НАГРУЖЕНИЕМ

### АННОТАЦИЯ

В статье приведены понятие «повреждаемости», классификация 39 причин повреждаемости бетона в строительных элементах без армирования и с армированием при статических нагрузках и воздействиях. Для характерных повреждений в бетоне в виде трещин при растяжении, сжатии, изгибе общие относительные деформации предлагается суммировать в виде составляющих: упругих, ползучести и псевдодеформаций от нарушений сплошности структуры бетона. Модуль деформаций повреждаемого бетона оценивается с учетом ползучести и повреждаемости, а полные относительные деформации – в соответствии с упруго-вязкой аналогией, с использованием меры ползучести и повреждаемости  $C_{II}(t, t)$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** классификация повреждений бетона, остаточная несущая способность.

**F.H. Ahmetzjanov** – candidate of technical science, associate professor

Tel.: (843) 510-47-05

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUA)

## CLASSIFICATION OF DAMAGES OF CONCRETE, THE PRECONDITION OF AN ESTIMATION OF ITS RESIDUAL BEARING ABILITY IN BUILDING ELEMENTS OF CONCRETE AT ABSENCE AND PRESENCE OF REINFORCING WITH SIMPLE MECHANICAL LOADING

### ABSTRACT

The article contains the notion of “Damage”, classification of 39 reasons of concrete damage in building elements under steady load and influence. Module of concrete deformation is valued with provision for creep and damage, full unit strains according to visco-elastic analogy, with the use of measure of creep and damage  $C_{II}(t, t)$ .

**KEYWORDS:** classification of damages of concrete, residual bearing ability.

### Введение

Под повреждениями понимаем нарушение сплошности структуры материала, неисправное состояние малого или большого объема материала, сопровождающееся признаками снижения эксплуатационных качеств (несущей способности): сопротивления, деформирование под нагрузкой или воздействием, уменьшения срока службы, герметичности, проницаемости, сопротивления теплоотдаче и др.

Ниже рассматриваем только первый признак.

В толковом словаре омонимов русского языка Т.В. Ефремовой (100 тыс. семантических единиц; М.: Мир энциклопедий, 2007) приведен омоним слова «повреждение» – дефект. В технической литературе слово «дефект» имеет иногда более узкое содержание (например, «отклонение от требований проектно-сметной документации»). Поэтому будем использовать первое слово, шире отражающее результаты процесса

нагружения и воздействия. Итоговой целью работы является разработка методики оценки остаточной несущей способности в соответствии с этапами следующей схемы:

Формулировка понятия → факторы, влияющие на процесс → ранжирование факторов → единицы измерения → предпосылки и гипотезы для моделирования процесса → модели процесса → разработка методики прогнозирования процесса повреждаемости бетона без армирования и с армированием в строительных элементах (СЭ).

Приведенная в таблице классификация повреждений (частично опубликованная в [1]) содержит 39 факторов, определяющих процесс возникновения и развития повреждаемости при эксплуатации (СЭ).

В настоящее время недостаток исследований не позволяет с требуемой точностью ранжировать эту совокупность факторов по силе влияния (чтобы иметь



в итоге убывающую по экспоненте кривую над осью факторов), поэтому перейдем к предлагаемым предпосылкам оценки остаточной несущей способности указанных выше элементов.

В последних нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций [2] отсутствуют указания по определению несущей способности бетонных элементов с повреждениями при растяжении. Отсутствуют также данные по оценке объема трещин, их заглупления в материал, распределению деформаций вокруг трещин и др., что не позволяет с достаточной точностью производить расчеты прочности, жесткости, перемещений бетонных и частично железобетонных элементов с повреждениями. Поэтому данная работа в определенной мере стремится к увеличению сведений о повреждаемых строительных элементах.

В общем случае прочностных расчетов повреждаемых элементов приходится отказываться от используемых в теориях упругости, пластичности и ползучести предпосылок о сплошности строения, однородности материала.

Однако, при определенных условиях (при малости элементов структуры и его неоднородности относительно рассматриваемых в задаче масштабов структуры, когда нарушения также относительно малы) приведенные выше предпосылки применимы.

Отметим, что неоднородность материала обуславливается многочисленными факторами незначительного индивидуального влияния каждого фактора (статистический разброс физико-механических характеристик), учитывается законами распределения в теории надежности твердых тел (механических систем) при рассмотрении вероятности их отказов от нагрузок и воздействий [3]. В большой совокупности элементов микроструктуры бетона условия кристаллизации обуславливают различие в размерах субмикроструктур геля и разницу в прочности (обратно пропорциональной размеру в степени минус одна вторая [4]).

В физике утверждается, что нет в природе идеальных кристаллов: даже по термодинамическим соображениям в них должно быть определенное число вакансий (точечных повреждений) [4].

Поэтому повреждения материалов можно считать «квазиоднородными» при размерах повреждений, сравнимых с масштабами того уровня структуры, который может считаться малым относительно рассматриваемого в задаче (например, в теории упругости пренебрегают зазорами (несплошностями) между молекулами при рассмотрении напряженно-деформированного состояния при нагружении строительных элементов).

Анализ данных экспериментов [6], полученных с использованием фотоупругих покрытий на участке чистого изгиба железобетонной балки, позволяет сделать вывод о том, что напряженные зоны всплеска

относительных деформаций вокруг трещин (с раскрытием до 0,1 мм), ограниченная величина, не превышающая в среднем  $3,3 \div 5$  мм, перпендикулярна берегу трещин и 20 мм в вершине трещины. При измерении ширины зоны измерялось расстояние от берега трещин до значения средней относительной деформации на оптическом покрытии балки по выделенному участку с несколькими трещинами (40 мм). Расстояние между трещинами 8,5; 14; 14 мм. При этом отношение величин максимальной деформации около образуемой трещины к минимальной на участке между трещинами колебалось от 3,7 до 17,5 раз. Гистограмма распределения плотности вероятностей относительных деформаций была близка к экспоненциальной. Наблюдается корреляция между раскрытием будущей трещины и максимумом деформации бетона около трещин. Осреднение величин деформаций на расстояние, превышающее раскрытие трещин на несколько порядков, приводит к сглаживанию колебаний деформаций на участках между трещинами и вне зоны влияния трещин (до двукратного отношения и менее). Следовательно, использование осреднения величин относительных деформаций в зонах вокруг трещин (при отсутствии взаимодействия последних) позволяет при раскрытии трещин до 0,1 мм предложить для оценивания напряженно-деформированного состояния нагруженного бетона метод «размазывания» неоднородностей в виде трещин по определенным участкам при растяжении, сжатии и изгибе.

При этом использование корреляции между параметрами трещин (длиной, раскрытием и заглуплением поверхностных трещин) с оценкой зоны всплеска (повышенной величины) деформаций вокруг трещин дает возможность выделять эти зоны (при необходимости) для индивидуального анализа напряженно-деформированного состояния.

В общем случае, полные деформации бетона состоят из упругих  $\varepsilon^e$ , вязких  $\varepsilon^{cr}$  и псевдопластических  $\varepsilon^{crc}$  (от трещин и нарушений сплошности структуры).

$$\varepsilon_g = \varepsilon^e + \varepsilon^{cr} + \varepsilon^{crc}, \quad (1)$$

При разгрузках исчезают упругие деформации, частично изменяется величина вязких и псевдопластических. Параметры трещин могут фиксироваться перед разгрузкой элементов, измерение параметров после разгрузки позволяет детализировать напряженно-деформированное состояние (например, степень влияния напряжений сдвига в зоне трещины, остаточные деформации ползучести, изменение модуля деформаций и др.).

Локальное или глобальное изменение модуля деформаций с учетом ползучести и повреждаемости бетона предлагается оценивать по формуле:

$$E(t) = E_0 / (1 + j_{c2} + j_n), \quad (2)$$

где  $E_0$  – начальный модуль упругости бетона;



## Классификация повреждений в бетоне и армированном бетоне

по группе событий	№№ п/п
1	2
I геометрическая	1 точечная 2 линейная 3 объемная
Ia – расположение по краевому признаку	4 поверхностная 5 в объемах элемента
II структурная	6 в кристаллах 7 блоках мозаики 8 зерна материала (цементного камня) и др. 9 по границам (поверхностям) элементов структуры (кристаллов, блоков зерен)
III физическая	10 кристаллизационное давление 11 перекристаллизация 12 усадка 13 осмотическое давление 14 капиллярные события 15 различие в размерах элементов структуры 16 замерзание и оттаивание влаги в нарушениях сплошности структуры 17 термообработка при изготовлении 18 фазовые переходы
IV физико-механическая	19 ползучесть 20 старение материала
V химическая	21 растворение 22 электро-химическая коррозия 23 изменение начального химического состава (с течением времени)
VI технологическая	24 неточности дозировки состава 25 низкое качество составляющих материалов 26 нарушения требования процесса изготовления 27 нарушение требований качества при хранении 28 нарушение требований качества при транспортировке 29 нарушение требований качества монтажа 30 нарушение требований качества при эксплуатации строительных элементов и систем
<b>Дополнительные факторы повреждаемости в армированном бетоне</b>	
При наличии армирования	31 нарушения сцепления с бетоном 32 анкеровки арматуры 33 повреждения защитного слоя бетона, способствующие возникновению коррозии арматуры 34 коррозия арматуры 35 ошибки проектирования (недостаточная величина защитного слоя бетона, недостаточный учет условий работы материалов, отсутствие защитных мероприятий и др.) 36 перегрузки материалов 37 следствие повреждения в системе элементов (например, трещинообразование при неравномерной осадке основания фундаментов и др.) 38 неравномерность процессов стабилизации деформаций (например, в небоскребе при восприятии эксплуатационной нагрузки, продолжающаяся ползучесть в элементах верхних этажей при затухании в нижних, вызывает появления трещин в элементах верхних этажей и др.) 39 малоцикловые нагружения (например, увеличение нагрузки от снеговых мешков при многочисленных оттепелях с намерзанием льда на покрытиях пристроен к многоэтажным зданиям и др.)



$J_n = \frac{e^{cr}}{e^e}$  – коэффициент (характеристика)

ползучести;  $J_n = \frac{e^{crc}}{e^e}$  – коэффициент повреждаемости (отношение величины псевдодеформаций – условных относительных деформаций из-за образования трещин (повреждений) к величине упругих деформаций).

– Вследствие наличия распределения вероятностей значений физико-механических характеристик бетона и изменчивости нагрузок, условий пребывания материала в определенных состояниях, как показали наблюдения за ограждающими конструкциями зданий и сооружений, параметры как начальных, так и позже возникающих повреждений со временем возрастают.

– При этом повреждения реализуются по траектории минимальных прочностных характеристик. То есть для повреждаемости справедлив экстремальный принцип минимума энергии образования повреждений, что позволяет использовать вариационные методы механики твердого деформируемого тела, при определении напряженно-деформированного состояния [7].

– Считаем, что деформации и псевдодеформации при повреждаемости малы (относительно характерных размеров элементов).

– К моменту разрушения магистральная трещина достигает критических параметров.

– Однако параметры повреждения в виде трещин в эксплуатационной стадии элементов не превосходят нормируемых величин (например, раскрытие при продолжительном нагружении не должно превосходить в железобетоне 0,3 мм), на поверхности бетона элемента.

– Принимается упруго-вязкая аналогия для повреждений рассеянных по объемам и площади бетонных и железобетонных элементов, при отсутствии взаимодействия между повреждениями. (Например, для модуля деформаций моделируемая выражением (2), а для деформаций с учетом ползучести и повреждаемости для проектных эксплуатационных напряжений  $\sigma(t, \tau)$  и приращение напряжений в момент  $\tau_i$ :

$$e(t) = \frac{s(t)}{E(t)} + s(t) \cdot C(t, t) + \int_{t_1}^t \frac{ds}{dt_1} \left[ \frac{1}{E(t_1)} + C_n(t, t) \right] dt_1 \quad (3)$$

$$C_n(t, t) = C(t, t) + e^{crc}(t, t_1) \quad (4)$$

Здесь  $\tau, t$  – моменты нагружения и оценки деформаций;

$\tau_i$  – момент приращения напряжения;

$C(t, \tau)$  – мера ползучести бетона;

$C_n(t, \tau)$  – мера ползучести и псевдодеформаций от повреждений бетона.

$$e^{crc}(t, t_1) = \sum_1^n a_i^{max} / l \quad (5)$$

– для этапа до появления магистральных трещин;

$$e^{crc}(t, t_1) = \sum_1^k (a_{ik}^{max} / m_i) \quad (6)$$

– для этапа при появлении магистральных трещин.

Здесь  $a_i^{max}$  и  $a_{ik}^{max}$  – максимальное раскрытие рассеянных и магистральных трещин соответственно;  $l, m_i$  – длина элемента, осредненное расстояние от магистральной трещины до ближайших трещин.

### Заключение

В статье основными результатами являются: запись составляющей относительных деформаций бетона от повреждений (выражение (1)); предложение коэффициента повреждаемости  $G_{II} = e^{crc} / e^e$ , используемого для оценок модуля деформаций повреждаемого бетона (по выражению (2)); введение меры неупругих и псевдодеформаций  $C_{II}(t, \tau)$  по выражению (4); предложение интегрального уравнения по выражению (3) для оценок деформаций упруго-вязко повреждаемого бетона на стадии рассеянной повреждаемости до появления магистральных трещин (до стадии локализации деформаций) и приближенных оценок по этому выражению при появлении магистральных трещин. Эти результаты, представляется, обладают научной новизной.

### Литература

1. Ахметзянов Ф.Х. К оценке прочности и долговечности повреждаемых бетонных и железобетонных элементов. – Казань: Изд-во «Новое знание», 1997.
2. СП52-101-2003.
3. Ржаницин А.Р. Надежность железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Стройиздат, 1984.
5. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов кристаллов. – М., 1984.
6. Зайцев Ю.Н. Механика разрушения для строителей. – М., 1991.
7. Васидзу К. Вариационные методы в механике твердого тела. – М.: Стройиздат, 1978.