

УДК 624.046.5

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

Тел.: (843) 510-47-05

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

## **ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ (ЧАСТЬ 2)**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье приведены в виде исходных положений (предпосылок) особенности поверхностных свойств бетона без армирования и с армированием при возникновении и развитии повреждений в виде трещин. По данным экспериментально-теоретических исследований обобщены сведения о микро- и макроповреждаемости цементного камня (бетона). Предложены оценки зоны повышенных деформаций вокруг трещин, параметров трещин, геометрического параметра повреждаемости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** поверхность бетона, повреждаемость.

**F.Kh. Akhmetzyanov** – candidate of technical science, associate professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

## **INFLUENCE OF SURFACE THE CONCRETES AND REINFORCED CONCRETES ELEMENTS ON THE DAMAGE (PART 2)**

### **ABSTRACT**

The article contains peculiarity of surface the concretes and reinforced concretes elements on the damage of sort's cracks. Principal clauses consist on determination of zones higher the deformation by cracks, parameters of cracks and geometrical parameters of damages.

**KEYWORDS:** surface, damage.

Используем следующие предпосылки:

1. На поверхности максимальны показатели воздействий окружающей среды: температуры, солнечной радиации, атмосферных осадков и т.д.
2. Наибольшую концентрацию напряжений в материале вызывают трещины.
3. При механическом нагружении (однократном, малоцикловом, многоцикловом, статическом, динамическом) трещины, прежде всего, образуются на поверхности.
4. В среднем, наибольшее количество трещин образуется на поверхности элементов.
5. Трещинообразованию в материале предшествует разрыв, появление нарушений сплошности структуры материала как следствие возрастания деформаций по площадкам или объемам.
6. Считаем, что с появлением трещин вплоть до определенного состояния (приводящего далее к снижению достигнутой, пиковой сопротивляемости нагружению или воздействию) при измерениях включают и раскрытие трещин в составе деформаций.
7. Нарушения сплошности структуры – многостадийный процесс, в котором до окончательной стадии глобального разрушения элемента (разделения на части) происходят местные (локальные) разрушения, охватывающие малые площадки и объемы.
8. В отличие от хрупкого разрушения, происходящего вследствие развития единичного дефекта, в бетоне образуется не одно, а множество нарушений сплошности, рассеянных по площадкам и объемам, и бетон сохраняет определенную сопротивляемость нагрузкам и воздействиям, т.е. является квазихрупким материалом.
9. В процессе распространения (развития) нарушений сплошности структуры в виде трещин последние по сравнению с размерами структурных (компонентов) бетона подразделяем на субмикро, микро, мезо, макро, магистральные трещины.
10. В общем случае дефекты (нарушения регулярности, сплошности структуры бетона) по геометрическому признаку подразделяются на точечные (вакансии, междуузлия), линейные (дислокации), плоские и объемные (поры, капилляры, трещины).

11. По времени зарождения указанные в п. 10 дефекты частично возникают в период изготовления элементов. Бетон – кристаллический материал. Часть дефектов (точечных) имеется в любых кристаллах (в природе идеальных кристаллов не существует [1]). Поверхностными дефектами решетки кристаллов являются межзеренные границы в поликристаллах (цементный камень и бетон – поликристаллические тела), границы двойников, внешняя поверхность кристалла. Включения с другой кристаллической структурой, аморфные включения – это трехмерные дефекты.

Реальные кристаллы обладают «мозаичной» структурой и состоят из «блоков» или «ячеек» размером около 1 мкм, слегка взаимно разориентированных (рис. 1). Вдоль границ таких блоков правильное расположение атомов (ионов) нарушено. При пластической деформации кристалла нарушается правильное расположение атомных плоскостей [1]. Кроме того, в цементном камне при изготовлении, нагружениях, воздействиях возникают дислокации, концентрация которых может достигать  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$  [2].

12. Участки концентрации напряжений (места расположения пор, вершины трещин, плоскости спайности и границы зерен кристаллитов) при нагружениях и воздействиях являются местом возникновения и последующего развития трещин в цементном камне. В основном это трещины (микротрещины) скола [3]. При этом отмечены два механизма образования ступенек скола: по плоскостям спайности при переходе в трещины в кристаллит с другой ориентации, либо в результате пластических сдвигов по плоскостям легкого скольжения, которые содержат молекулы подвижной воды.

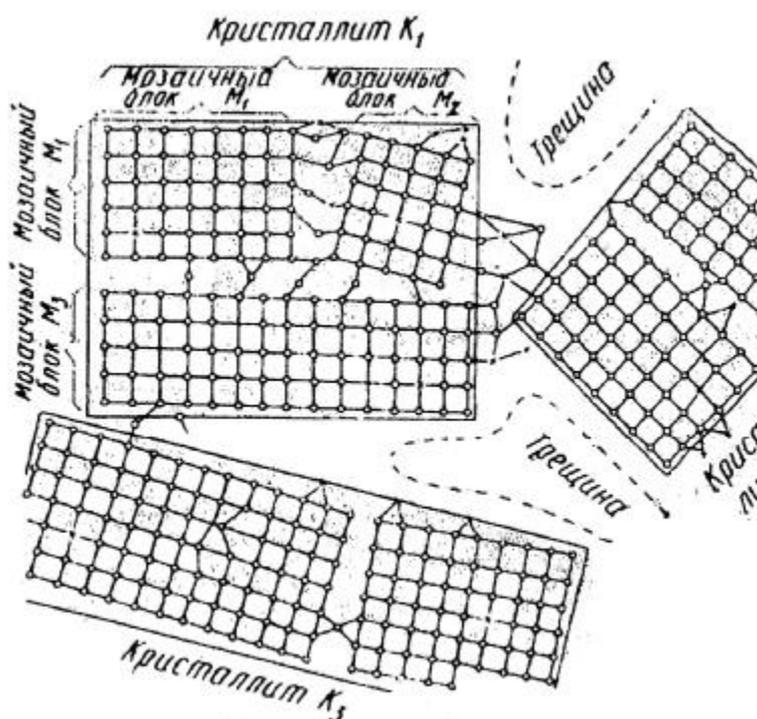


Рис. 1. Схема строения реального твердого тела [17]

Однако необходимо отметить следующие особенности деформации в поликристаллических материалах: из-за разной ориентации зерен деформация в них начинается неодновременно и развивается неоднородно. В первую очередь скольжение идет в благоприятно ориентированных зернах, внутри которых имеется система скольжения, где действуют максимальные касательные напряжения. В этих зернах, если они имеют достаточно большие размеры, некоторое время может наблюдаться типичное легкое скольжение.

Однако макроскопическое удлинение образца за счет легкого скольжения практически невозможно. Благоприятно ориентированных зерен обычно относительно мало, и они разобщены. Дислокация внутри благоприятно ориентированных зерен на начальных стадиях деформирования скользят без серьезных помех на большие расстояния, и многие из них доходят до границ зерен. Последние, как известно, являются эффективным барьером для дислокаций, которые тормозят здесь, образуя скопления. Вокруг скоплений возникают поля упругих напряжений, которые действуют на границы и прилегающие к ним участки соседних зерен в дополнение к приложенным извне напряжениям. В этих условиях могут работать дислокационные источники в приграничных областях,

несмотря на относительно неблагоприятную ориентировку систем скольжения генерируемых ими дислокаций. Так происходит эстафетная передача деформации в поликристалле [4].

Прогрессирующее образование большого числа скоплений у границ возможно лишь на начальных стадиях деформации. Главной особенностью картины является неизбежность плотного контакта между зернами. Если бы каждое зерно деформировалось самостоятельно, вне связи с соседними, то на границах неизбежно возникали бы сплошности и полости, которые приводили бы к преждевременному разрушению. Теоретически, для предотвращения их возникновения необходимо, чтобы в приграничных областях работало минимум пять систем скольжения. Такое множественное и «согласованное» скольжение и обеспечивает целостность приграничных областей в процессе деформации. В результате интенсивной деформации приграничных объемов там наблюдается повышенная плотность дислокаций. Как показывают эксперименты, вдали от границ множественное скольжение в поликристаллах также начинается уже на ранних стадиях макродеформации. Вид упаковки ионов (атомов) в кристаллах влияет на количество плоскостей скольжения при деформировании.

В исследованиях с гексагональной плотно упакованной решеткой наиболее важным отличием с точки зрения деформации является наличие всего одной базисной плоскости преимущественного скольжения  $\{0001\}$  по нижнему основанию. Плотность упаковки атомов (ионов) в этой плоскости значительно больше, чем в любых других, и поэтому скольжение в небазисных плоскостях затруднено и идет под действием высоких напряжений на поздних стадиях деформации.

В связи с тем, что в цементном камне кристаллогидраты имеют неодинаковый химический состав, формируются разные типы кристаллических решеток. Если упаковка не является плотнейшей, то наблюдаются несколько плоскостей с близкой плотностью упаковки и, следовательно, будет несколько плоскостей с наибольшим межплоскостным расстоянием [4, 5].

Перечисленные особенности кристаллитов (зерен) цементного камня: ограниченное (меньше пяти) число систем скольжения на границах кристаллитов, различие в ориентации плоскостей спайности приводит к механизму микроскола на этих границах (т.е. ограничению пластической деформации, начавшейся скольжением (преимущественно сдвигами) в пределах кристалла – квазихрупкости. Возникшие при этом трещины развиваются далее (при повышении нагрузок и воздействий) преимущественно по механизму отрыва. Последний механизм объясняется тем, что в вершине растущей трещины перестройки атомов (ионов) происходят гораздо сложнее, чем в ядре дислокации [1].

При взаимодействии частиц цементного камня реализуется ионная связь (предельный случай ковалентной связи), характеризуемая сильным различием электроотрицательности. При сближении валентные электроны одного атома полностью переходят на другой. В результате оба атома становятся ионами и принимают электронную структуру ближайшего благородного газа. Обычно ионную связь в физике (химии) рассматривают с помощью классических законов электростатики. Ионные кристаллы связаны электростатическими силами.

Ионные соединения имеют высокую прочность и температуры плавления.

Ионная связь не обладает свойствами направленности и насыщенности [1], в отличие от ковалентной связи. Это обусловлено тем, что электрическое поле, создаваемое ионами, имеет сферическую симметрию и действует одинаково на все ионы.

Поэтому количество ионов, окружающих данный ион, и их пространственное расположение определяются только величинами зарядов ионов и их размерами.

Степень ионности в соединениях кальция и кремния может быть различной. Например, в  $\text{CaO}$  она составляет 79 %, в  $\text{SiO}_2$  – 51 % [7].

При электростатическом взаимодействии между ионами происходит их деформация, называемая поляризацией. Чем больше поляризация ионов (приводящая к уменьшению эффективного расстояния между центрами положительных и отрицательных зарядов), тем меньше степень ионности, т.е. тем больше ковалентный характер связи между ними. В кристаллах поляризация оказывается не очень высокой (т.к. ионы симметрично окружены ионами противоположного знака и ион подвергается одинаковому воздействию во всех направлениях).

Целью вышеизложенного текста было представление влияющих причин в процессе взаимодействия элементов структуры цементного камня (бетона) с точки зрения физико-химии. При этом важны сведения об энергии кристаллической решетки ионного кристалла. Ее можно рассчитать по методу Борна-Габера. Для конкретных расчетов необходимо знать число ионов, окружающих рассматриваемый ион (координационное число)  $U$  и валентности  $z$  ( $z_1 \dots z_i$ ), а также расстояние

между центрами близлежащих друг к другу противоположно заряженных ионов  $r$  ( $r_a$  – для иона,  $r_k$  – для катиона). Капустинским А.Ф. предложена следующая формула для расчета энергии кристаллической решетки [7]:

$$U = \left[ 1200 \cdot \sum nr^2 (1 - 0,345 / (r_a - r_k)) \right] / (r_a + r_k). \quad (1)$$

Для  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  вычисленная по формуле (1) энергия решеток соответственно равна (в кДж/моль): 3433; 13233; 15354. Погрешность этих определений по сравнению с экспериментальной составляет от -3 до +2,1 %.

Поскольку неупругие смещения в кристаллах (и в моно, и поликристаллах) в большинстве случаев происходят путем движения дислокаций (по основному атомному механизму неупругих деформаций [1, 4, 8], а дислокаций в структуре цементного камня при нагружении и воздействиях возникает большое число [2], во всяком случае достаточное для локального разрушения микроструктуры [9].

Конечная формула, связывающая величину макроскопической деформации сдвига с плотностью дислокаций  $c$ , длиной их пробега  $l$  и вектором Бюргерса  $b$  [1]:

$$e = r \cdot l \cdot b, \quad (2)$$

Установлено, что в нитевидных кристаллах мало дислокаций (они даже могут отсутствовать [10]). В микроструктуре цементного камня имеются подобные кристаллы иглообразной формы – этtringит.

### Возрастание неравномерности деформирования бетона на поверхности железобетонного элемента при трещинообразовании

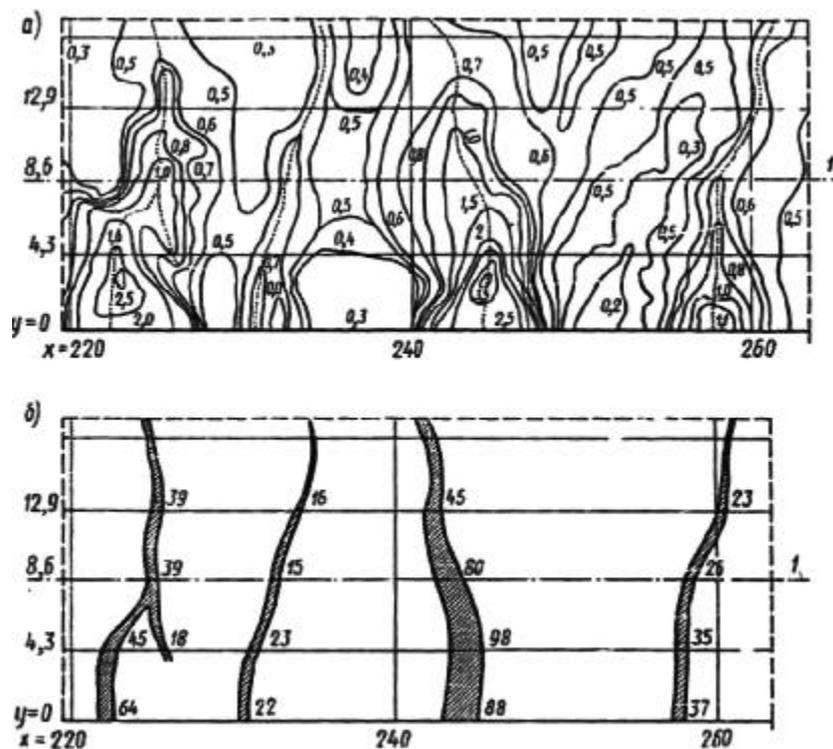


Рис. 2. Изохрома ширины раскрытия трещин на железобетонной балке (в зоне чистого изгиба) [11]:  
а – изохроммы: б – ширина раскрытия трещин (в мм); 1 – ось арматуры

По картине трещин и величин изохром, полученных при испытании железобетонной балки с использованием фотоупругих покрытий (в зоне чистого изгиба) [11] (рис. 2), и результатам нашего анализа приходим к следующим выводам:

а) перед появлением трещин и раскрытием их (в данном случае до 0,098 мм) в зонах вокруг трещин возникает резкое возрастание относительных деформаций. Максимальная величина их всплеска находилась около нижней образующей арматурного стержня (в плоскости будущих трещин). Отношение величин на вершинах всплесков к величине максимального спада (на линии, проходящей по вершинам всех четырех трещин на рассматриваемом участке) составляло от 3,5 до 17,5. При этом это отклонение чуть выше верхней образующей арматурного стержня (куда вершины трещин не дошли) было не более трех раз.

«Всхолмления» относительных деформаций круто спадают в перпендикулярном направлении к берегам трещин и более полого вдоль будущей траектории трещин. Площадь плато около вершин резко уменьшается в размерах (до 1... 2,5 мм в диаметре). Траектория будущих трещин не строго линейных отрезков, очевидно, завися и от размеров структурных элементов материала.

Наиболее важным фактом является ограниченность расстояний от берега трещин для всплесков относительных деформаций, которые составляют не более 3...5 мм (в зоне максимальных градиентов относительных деформаций  $de/dx$ , где  $dx$  – приращение координаты, перпендикулярное к траектории трещины).

Это позволяет прогнозировать ширину зоны повышенных относительных деформаций бетона около берегов трещин не только в пределах высоты защитного слоя бетона (равной максимальному раскрытию трещины плюс  $2 \times 5 = 10$  мм), но и выше на полдиаметра арматурного стержня.

Отношение длины трещины к максимальному раскрытию (считая, что вторая слева трещина имеет длину  $l = 17,2$  мм) равно:  $l/a_{crc}^{max} = 17,2/0,023 = 748$ .

Представляют интерес следующие данные: средние значения относительных деформаций в 17,2 мм от нижней грани железобетонной балки в 2,23 раза меньше, чем у нижней образующей арматурного стержня, что вызвано увеличением относительных деформаций при образовании трещин. При этом, у более раскрытых трещин наблюдается более интенсивное увеличение относительных деформаций. Отношения максимальных величин всплесков относительных деформаций к максимальному раскрытию соответствующей трещины (всем четырем трещинам) находятся в интервале 3,04...3,90, при среднем 3,41. Отклонения от среднего от +14,3 до -12,2 %.

Диаграмма деформирования  $\epsilon$  прямолинейна в пределах упругости и нелинейна в пределах неупругости до наступления разрывов сплошности, а после наступления разрыва (появления трещины) относительные деформации дополнительно возрастают, и диаграмма искривляется еще в большей степени. Поэтому наличие трещин благоприятно располагаемых относительно потока напряжений для последующего раскрытия вызывает необходимость учета псевдодеформаций от раскрытия трещин в соответствующем поперечном сечении (без армирования или с армированием).

Как показывают эксперименты [12], параметры трещин коррелированы между собой, находясь в определенном соотношении (например, для тяжелого бетона) при растяжении отношение длины макротрещины к максимальному ее раскрытию на поверхности.

$$l_y/a_{crc}^{max} \approx 3000...6000, \quad (3)$$

Отношение заглупления трещины с поверхности в нижерасположенные объемы бетона:

$$l_z/a_{crc}^{max} \approx 300...600. \quad (4)$$

Здесь координаты  $y$ ,  $z$  обозначают соответственно направление, перпендикулярное горизонтальной продольной оси элемента на поверхности элемента и по нормали к поверхности.

Определенный разброс соотношений можно объяснить влиянием большого числа факторов, более трех десятков [13], которые к настоящему времени по влиянию на сопротивляемость повреждаемости изучены недостаточно. Наиболее существенно влияющие среди них (прочностные и деформативные характеристики) имеют определенный закон распределения по вероятности величин [14].

Предложенные оценочные выражения (3), (4) позволяют ориентировочно определять площадь трещины в рассматриваемых поперечных сечениях элементов и, следовательно, геометрический параметр повреждаемости  $\Pi$  [15], с учетом которого можно определить эффективное напряжение в поперечном сечении  $y_s$  [16].

$$s_y = s_0 / (1 - \Pi)^a, \quad (5)$$

где  $y_0$  – напряжение в рассматриваемом сечении без учета повреждений, определяемое по действующим нормам проектирования.

$$\Pi = A_{crc} / A_0, \quad (6)$$

здесь  $A_{crc}$ ,  $A_0$  – соответственно площадь трещин в рассматриваемом сечении элемента, площадь поперечного сечения без повреждений.

$b$  – коэффициент влияния неучтенных факторов (до накопления экспериментальных данных принимается равным 1, к примеру, несимметричная трещина относительно центра тяжести поперечного сечения может вызывать появление некоторого изгибающего момента от равнодействующей напряжения по площади нетто, могут быть концентраторы напряжений и др.).

Далее вычисленное  $y_s$  сравниваем с расчетным сопротивлением бетона, например  $R_b$ :

$$s_{\sigma}/R_b \leq 1, \quad (7)$$

$$s_{\sigma}/R_b > 1, \quad (8)$$

Первый случай сравнения показывает соблюдение требований прочности в рассматриваемом сечении элемента, второй – нет.

### Заключение

Основные результаты статьи – обобщены некоторые сведения о свойствах поверхности бетона в строительных элементах, влиянии микроструктурного строения на повреждаемость, предложены количественные оценки для величины относительных деформаций в зависимости от плотности, длины пробега дислокаций, для величины зон повышенных деформаций вокруг трещин с раскрытием до 0,1 мм, приведены осредненные соотношения для параметров макротрещин, позволяющие ориентировочно определять объем трещин, предложен геометрический параметр повреждаемости в поперечном сечении элемента с трещиной для определения эффективного напряжения, позволяющего ориентировочно судить о работоспособности элемента в рассматриваемом сечении с трещиной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. – М.: Высшая школа, 1983.
2. Макридин Н.М., Моисеева И.Н., Прошин А.Н., Соломатов В.Н., Соколова Ю.А. Структура, деформативность и критерии разрушения цементных бетонов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2001.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Высшая школа, 1978.
4. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Изд-во Металлургия, 1983.
5. Пенкаля Т. Очерки кристаллохимии. – Л.: Химия, 1974.
6. Gandhi C, Ashby M.F. Acta met, 27, 1565-1602, 1979.
7. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов. – М.: СИ, 1981.
8. Коттрел Л. Теория дислокаций. – М.: Мир, 1969.
9. Ахметзянов Ф.Х. Особенности физической структуры цементного камня и микроструктурная повреждаемость // Сб. статей III Международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика». – Пенза, 2004. – С. 21-30.
10. Макмиллан Н. Идеальная прочность твердых тел. Новое в зарубежной науке // Атомистика разрушения. Сб. статей. Вып. 40. – М.: Мир, 1987. – С. 35-103.
11. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая школа, 1991.
12. Ахметзянов Ф.Х., Арсентьев Е.З. О соотношении заглупления трещин в бетоне к ширине их раскрытия на поверхности бетонных и железобетонных конструкций // Тезисы 2-ой всесоюзной конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции». – Чебоксары, 1999. – С. 26-28.
13. Ахметзянов Ф.Х. Классификация поврежденных бетона, предпосылки оценки его остаточной несущей способности в строительных элементах бетона при отсутствии и наличии армирования с простым механическим нагружением // Известия КазГАСУ, 2009, № 2(12). – С. 99-102.
14. Лычев А.С., Карякин И.Н. Надежность железобетонных конструкций. – Самара, 1985.
15. Ахметзянов Ф.Х. К оценке прочности и долговечности повреждаемых бетонных и железобетонных элементов. – Казань: «Новое знание», 1997.
16. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкции. – М.: Наука, 1968.
17. Мгедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1971.