

УДК 624.012

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций

А.Г. Тамразян^{1*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
*tamrazian@mail.ru

Ключевые слова: железобетонные конструкции, несущая способность, надежность, вероятность, износ, старение, механизм повреждений, срок службы.

История статьи

Поступила в редакцию: 04.11.2022

Доработана: 12.11.2022

Принята к публикации: 15.11.2022

Для цитирования

Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирования срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.

Аннотация. Железобетонные конструкции могут подвергаться агрессивному воздействию окружающей среды, что приводит к снижению их несущей способности в течение срока службы. Если оценка безопасности таких конструкций должна быть выполнена для возможности продолжения эксплуатации, основной задачей было бы обеспечение их способности выдерживать будущие экстремальные нагрузки в течение предполагаемого срока службы с уровнем надежности, достаточный для безопасности.

В настоящее время не существует методологий для проведения такой оценки.

Настоящая методология предлагается для облегчения количественных оценок текущей и будущей конструктивной надежности и несущей способности железобетонных конструкций. Эта методология учитывает случайный характер прошлых и будущих нагрузок, а также деградацию в результате негативных факторов окружающей среды.

Оценка надежности и износа железобетонных конструкций, зависящая от времени, обеспечивает основу для определения продолжительности безопасной эксплуатации.

Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures

Ashot G. Tamrazyan^{1*}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

*tamrazian@mail.ru

Keywords: reinforced concrete structures, bearing capacity, reliability, probability, deterioration, aging, damage mechanism, service life.

Abstract. Reinforced concrete structures can be exposed to aggressive environmental influences, which leads to a decrease in their bearing capacity during their service life. If a safety assessment of such structures is to be carried out in order to be able to continue in service, the main challenge would be to ensure that they can withstand future extreme loads over their intended lifetime with a level of reliability sufficient for safety.

Ашот Георгиевич Тамразян, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: tamrazian@mail.ru

Ashot G. Tamrazyan, Corresponding member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoeshosse, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: tamrazian@mail.ru

© Тамразян А.Г., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Article history

Received: 04.11.2022

Revised: 12.11.2022

Accepted: 15.11.2022

For citation

Tamrazyan A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023;1(1): 5–18.

There are currently no methodologies for such an assessment.

This methodology is proposed to facilitate quantitative assessments of the current and future structural reliability and load-bearing capacity of reinforced concrete structures. This methodology takes into account the random nature of past and future pressures, as well as degradation as a result of negative environmental factors.

The time-dependent reliability and deterioration assessment of reinforced concrete structures provides the basis for determining the duration of safe operation.

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные сооружения и конструкции подвержены старению, которое относится к зависящим от времени изменениям, и которое может повлиять на способность системы выдерживать различные требования, связанные с работой, окружающей средой и авариями. В [1] определяют старение как кумулятивные изменения с течением времени, вызванные естественными внутренними процессами, внешними факторами, эксплуатационным износом. В железобетонных конструкциях свойства бетона изменяются в течение длительного времени по сравнению с заданными свойствами, используемыми в качестве основы для расчетов конструкции. Некоторые факторы за 25-летний период могут увеличить прочность бетона в два и более раз, если он защищен от неблагоприятного воздействия окружающей среды [2]. Однако существует и множество других факторов окружающей среды, которые могут вызывать неблагоприятные изменения строительных материалов [3,4]. В промышленных зонах, например, высокая плотность углекислого газа в железобетонных конструкциях проникает через защитный слой бетона к арматуре и может привести к возникновению коррозии, что приведет к растрескиванию бетона и снижению несущей способности. Сульфаты в некоторых грунтах разрушают бетон в контакте с ним и приводят к растрескиванию, а в некоторых случаях, к разрушению бетона. Таким образом, структурное сопротивление может уменьшаться со временем, вызывая ускорение риска разрушения конструкции.

Основная проблема при оценке конструкций по дальнейшей эксплуатации заключается в том, чтобы убедиться, что их способность противостоять экстремальным явлениям не ухудшилась из-за старения в течение их предыдущей истории эксплуатации. Текущие своды правил для гражданских конструкций учитывают неопределенный характер сопротивления и нагрузок только субъективным образом [5,6].

Предполагается, что проектные пределы безопасности остаются относительно постоянными в течение всего срока службы конструкции [7]. При разработке норм не предполагается, что периодически проводятся проверки, техническое обслуживание и ремонт.

Проблема безопасности в проектировании конструкций может быть более рационально решена с помощью вероятностных методов. Эти методы обеспечивают основные инструменты для количественной оценки безопасности конструкции. Неопределенности в нагрузках, свойствах материалов и строительстве, которые традиционно рассматривались с помощью эмпирических коэффициентов безопасности, могут быть учтены явно и последовательно в вероятностной оценке безопасности. Такие методы использовались для разработки первых поколений норм проектирования предельных состояний, в которых проверки безопасности были связаны с заданной вероятностью или надежностью предельного состояния [8]. Ни существующие, ни предлагаемые нормы прямо не касаются ухудшения прочности из-за старения. Однако проблемы старения могут возникать в компонентах конструкции, и для оценки надежности в течение срока службы необходимо учитывать поведение конструкции во времени.

Износ конструкций может быть незаметен до тех пор, пока отказ не станет неизбежным. Кроме того, практически невозможно заменить элементы конструкции без вывода объекта из

эксплуатации на длительное время. Имеются лишь ограниченные данные для описания их эксплуатационных характеристик. Таким образом, конструкции на самом деле могут быть более важными, в то время как для оценки их эксплуатационных характеристик было сделано меньше работ.

Предыдущие анализы надежности конструкций, зависящие от времени, были направлены главным образом на определение вероятностных распределений времени до усталостного разрушения металлических конструкций. Для железобетонных конструкций было проведено мало исследований, в которых учитывалось изменение сопротивления во времени. В [7] представлено несколько примеров для оценки вероятности отказа железобетонных конструкций с износом, вызванным коррозией арматуры [9,10,11]. В этих исследованиях предельное состояние конструкции определялось либо как скалывание бетона, либо как появление поверхностных трещин. Однако вероятность разрушения конструкции при случайной последовательности нагрузок не рассматривалась.

Основанные на надежности методы оценки текущего состояния и будущей безопасности железобетонных конструкций должны учитывать стохастический характер прошлых и будущих нагрузок, случайность прочности и неопределенность изменений материала в результате старения и возможной деградации, механистические модели структурного поведения, зависимые от времени, используемые для прогнозирования, а также осмотр и неразрушающие методы оценки [12].

Затраты на осмотр и ремонт могут составлять значительную часть общей стоимости жизненного цикла железобетонной конструкции. Эти затраты должны быть уравновешены получаемыми выгодами как с экономической точки зрения, так и с точки зрения надежности. Существуют компромиссы между объемом и точностью проверки, требуемым уровнем надежности и стоимостью. Можно было бы представить две альтернативы: относительно частые, но поверхностные проверки или нечастые, комплексные проверки.

Срок службы конструктивных элементов и систем из обыкновенного или предварительно напряженного железобетона зависит от того, как свойства материала и, следовательно, сопротивление конструкции изменяются с течением времени. Такие изменения вызываются естественными химическими и физическими процессами, факторами внешней среды, чрезмерными нагрузками во время испытаний, экологическими или аварийными событиями, износом во время сервисной эксплуатации, неправильным использованием и техническим обслуживанием. Анализ надежности, зависящий от времени, необходим, чтобы сосредоточить внимание на этих факторах с точки зрения анализа риска.

Несущая способность конструкции при эксплуатации оценивается путем сравнения ее состояния с одним из нескольких предельных состояний. Когда конструкция или элемент конструкции становятся непригодными для использования по назначению, говорят, что они достигли предельного состояния. В разработанной впоследствии методологии оценки состояния, основанной на надежности, характеристики конструкции в условиях неопределенности измеряются с точки зрения вероятности достижения предельного состояния. Предельные состояния относятся к безопасности в экстремальных условиях. Бетон в конструкции считается разрушенной, когда действующая на него нагрузка (например, осевая сила, момент, сдвиг или какая-либо комбинация этих воздействий) превышает его прочность в этот момент. Такое событие должно иметь низкую вероятность возникновения. Предельные состояния работоспособности относятся к нарушению функции в условиях нормального использования. Чрезмерные прогибы или ширина раскрытия трещин при нормальных эксплуатационных нагрузках являются примерами предельных состояний пригодности к эксплуатации в железобетонных конструкциях.

Приемлемая вероятность предельного состояния пригодности к эксплуатации обычно на несколько порядков выше, чем для предельного состояния, связанного с безопасностью.

Вопросы старения и долговечности вводят фактор времени в расчет предельных состояний [13].

Нельзя рационально решать вопросы долговечности без введения понятия срока службы. Когда происходит старение, прочность конструкции со временем меняется, и вероятность предельного состояния должна определяться относительно срока службы, чтобы ее можно было использовать в качестве переменной для принятия решения [14].

Большая часть исследований долговечности материалов была направлена на фундаментальные физико-химические процессы или изменения свойств материалов, которые могут происходить в агрессивных средах, а не на изменения, которые влияют на поведение конструкции, изготовленной из этих материалов. Примером этого является карбонизация бетона. Карбонизация сама по себе не вызывает каких-либо конструктивно значимых изменений в прочности железобетонной конструкции. Структурное воздействие наступает только после того, как фронт карбонизации достигает уровня стальной арматуры, что приводит к депассивации поверхности арматуры и возможному возникновению коррозии [3,7]. Таким образом, с точки зрения структурного поведения важно иметь возможность предсказать время, за которое карбонизация проникнет на уровень армирования. Аналогичные примеры есть и с другими механизмами деградации. Исследования материалов на микроуровне должны быть переведены в структурные эффекты на макроуровне, чтобы быть полезными в анализе структурной надежности.

Методологии оценки состояния и прогнозирования срока службы, основанные на надежности, должны обеспечивать составление графика плановых осмотров, если это необходимо, чтобы поддерживать вероятность отказа конструкции на уровне или ниже установленной целевой вероятности в течение срока ее службы.

Для анализа надежности и прогнозирования срока службы железобетонных конструкций требуются стохастические модели прочности конструкции, зависящие от времени [15]. Стохастические изменения прочности с течением времени не учитывались в предыдущих исследованиях по разработке норм надежности для железобетона. Теоретически стохастические модели прочности могут быть получены из математических моделей, описывающих влияние процесса старения в результате эксплуатации и факторов окружающей среды на стальные и железобетонные материалы и геометрию компонентов, из ускоренных ресурсных испытаний или из комбинации этих двух методов. На современном уровне качественные эффекты почти известны, а количественные модели, описывающие процессы деградации материала, часто носят эмпирический характер.

Ухудшение для нескольких распространенных механизмов деградации качественно иллюстрируется моделями на рис. 1.

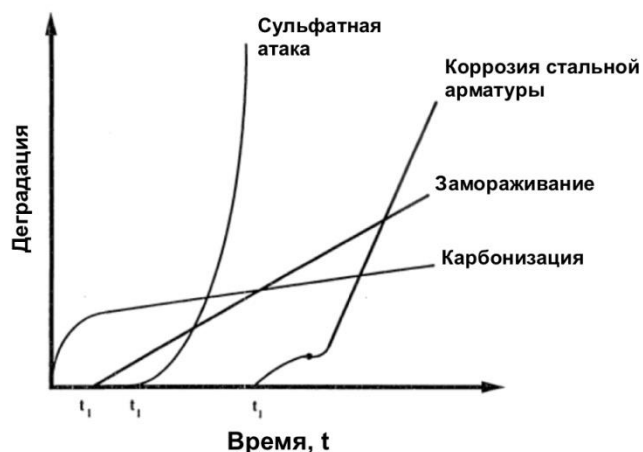


Рис.1. Механизмы деградации материалов
Figure 1. Material degradation mechanisms

Для определения срока службы часто требуется, чтобы эти модели экстраполировались за пределы диапазона экспериментальных данных. Ускоренные испытания на срок службы вносят значительные неопределенности в его прогнозирование [16].

Механизмы деградации железобетонных зданий, мостов и сооружений, атомные электростанции являются общими для всех. В предварительно напряженных железобетонных конструкциях система предварительного натяжения оказывается наиболее уязвимой к разрушению, в то время как в обычных железобетонных конструкциях коррозия арматуры оказывается более важной. Большинство дефектов железобетонных конструкций, которые могут привести к износу, становятся очевидными в течение нескольких лет после строительства. Кратко рассматриваются факторы окружающей среды и механизмы деградации, наиболее важные для определения срока службы железобетонных конструкций.

Акцент делается на детерминированные тенденции; оценки неопределенностей даются в тех случаях, когда известны статистические данные.

Вероятно возникновение комбинированных эффектов и зависимостей между различными механизмами деградации. Однако необходимых данных для учета таких зависимостей не существует. Таким образом, необходимо рассматривать эти эффекты независимо друг от друга.

МЕТОД

Механизмы деградации бетона

Бетон, который был правильно спроектирован, замешан, уложен и отвержден, увеличивает свою прочность намного выше указанной прочности на сжатие через 28 или 90 дней, используемых в качестве основы для проектирования, при условии, что вода доступна только для непрерывной гидратации. Нередки случаи увеличения прочности бетона в 2 и более раза за 50 лет, если он защищен от агрессивных сред. Увеличение прочности бетона в зависимости от времени $f_c(t)$ может быть представлен в виде (1):

$$f_c(t) = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} \cdot f_c' \quad (1)$$

где t - в днях, α и β являются константами. Для цемента $\alpha = 8$ и $\beta = 0,67$ [17].

Эта модель основана на экспериментальных данных до 1 года.

Эксперименты, проведенные в течение 50 лет [2], показывают, что увеличение прочности на сжатие примерно пропорционально логарифму возраста в течение первых 10–50 лет, и почти сразу после этого прочность очень сильно изменяется. Таким образом, $f_c(t)$ можно определить как (2):

$$\frac{f_c(t)}{f_{c28}} = \begin{cases} \alpha + \beta \ln t; t < t_M \\ \alpha + \beta \ln t_M; t \geq t_M \end{cases}, \quad (2)$$

где f_{c28} - прочность бетона на сжатие через 28 дней, t - в днях, а t_M - зависит от химического состава бетона. Для бетона, изготовленного с относительно низким содержанием C2S, который обеспечивает длительную прочность бетона, $t_M = 10$ лет и $\frac{f_c(t_M)}{f_{c28}} = 1,67$, что дает $\alpha = 0,541$ и $\beta = 0,138$. Коэффициент вариации для 50-летней прочности на сжатие для заданного набора переменных варьируется от 5 до 10 %.

Однако срок службы бетона, подверженного воздействию агрессивных факторов внешней среды, может быть значительно меньше.

Многие из доступных данных относятся к процедурам проектирования для минимизации проблем старения или долговечности новых железобетонных конструкций, а не к прогнозированию срока службы существующей конструкции. Единственным наиболее важным фактором, влияющим на качество бетона, является его водопроницаемость, от которой зависит скорость проникновения агрессивных веществ.

Сульфатная атака бетона

Сульфатное воздействие является обычной проблемой для бетона, находящегося в контакте с почвой, особенно в тех частях, где в почве и грунтовых водах обнаруживаются встречающиеся в природе сульфаты кальция, натрия, калия и магния. Разложение под воздействием сульфатов ускоряется циклами увлажнения и высыхания (особенно восприимчива область фундамента здания у уровня земли) и происходит за счет сочетания конвекции и абсорбции. Сульфатное воздействие приводит к расширенным внутренним реакциям, проявляющимся растрескиванием и последующим разрушением бетона, когда расширение достигает примерно 0,5%. Глубина сульфатного воздействия, по-видимому, линейно зависит от времени [18], т. е. (3)

$$x(t) = K \cdot t, \quad (3)$$

где $x(t)$ - глубина разрушения, t - прошедшее время, K - константа, зависящая от количества трикальций алюмината в бетоне и концентрации сульфатной среды.

Неопределенность прогноза, измеряемая коэффициентом вариации, составляет около 0,3. Нелинейное значение атаки, пропорциональное t^n при $n > 1$, также было предложено для моделирования потери сечения [4].

Щелочно-агрегатные реакции

Этот источник деградации возникает из-за реактивных заполнителей в бетонной смеси и, таким образом, в отличие от большинства других рассмотренных механизмов, не зависит от агрессивного внешнего фактора. Обширные щелочно-агрегатные реакции требуют источника воды. Такие реакции могут протекать в основном с кремнистыми и редко с карбонатными агрегатами.

Реакция расширения может привести к развитию внутренних напряжений и растрескиванию бетона. Такое растрескивание имеет тенденцию к равномерному распределению по большой площади поверхности бетонной конструкции, может повысить ее уязвимость к другим агрессивным факторам и привести к коррозии арматуры [19].

Ухудшение прочности на сжатие и растяжение, а также модуля упругости из-за кремнистых включений зависит от расширения [20]. Деградация, по-видимому, является линейной функцией расширения. Повреждение кремнистых включений обычно становится очевидным в течение нескольких лет после строительства; однако были случаи, когда повреждения не проявлялись до 20 лет после строительства, или когда реакция продолжалась 40 и более лет [4,20]. Расширение бетона 0,08 мм/м/год было измерено в крупных плотинах. Отсутствует математическая модель для прогнозирования разрушения структуры из-за реакции щелочи с заполнителями [18], хотя есть свидетельства того, что основная реакция контролируется диффузией [4].

Циклы замораживания-оттаивания

Это в основном проблема, когда открытый влажный бетон подвергается циклам замораживания и оттаивания. Горизонтальные бетонные поверхности, где вода может оставаться в контакте с бетоном в течение некоторого времени, особенно подвержены повреждениям от замерзания и оттаивания. Критический уровень насыщения для повреждения при замораживании-оттаивании составляет около 85%. Вода при замерзании увеличивается в объеме примерно на 9%, что приводит к растрескиванию и отслаиванию бетона.

Выщелачивание

Выщелачивание гидроксида кальция вызывает снижение pH и прочности бетона.

Бетон теряет прочность, поскольку растворимые компоненты бетона растворяются в присутствии воды. Если нерастворимые продукты рекристаллизуются и расширяются в системе пор, возникают растягивающие напряжения, которые могут привести к растрескиванию поверхности. Снижение pH также может инициировать коррозию арматуры [21]. Скорость выщелачивания зависит от проницаемости и пористости бетона, а процесс контролируется диффузией.

Эффекты повышенной температуры

Повышенные температуры вызывают снижение прочности на сжатие, прочности на растяжение и начального модуля упругости. Это снижение показано на рисунках 2-4.

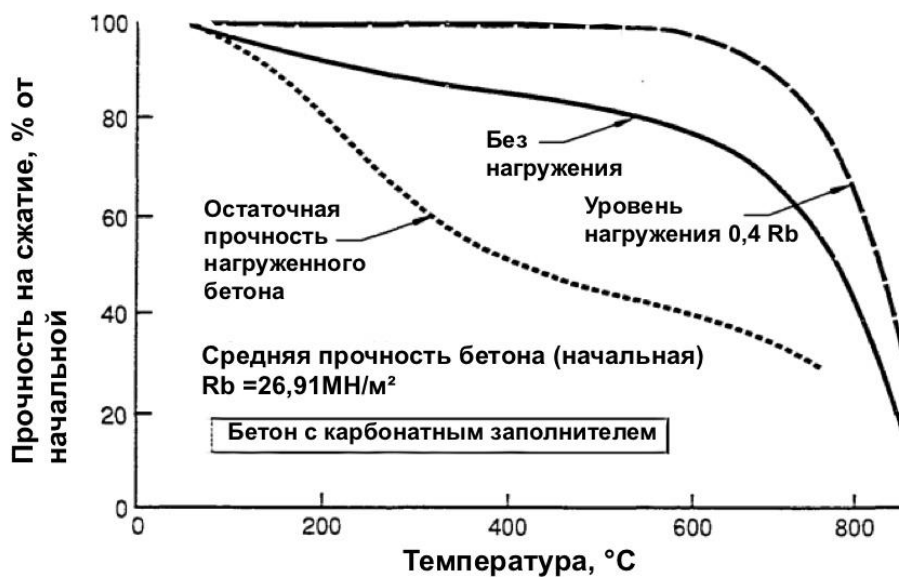


Рис.2. Прочность бетона на сжатие при повышенных температурах и после охлаждения
Figure 2. Compressive strength of concrete at elevated temperatures and after cooling

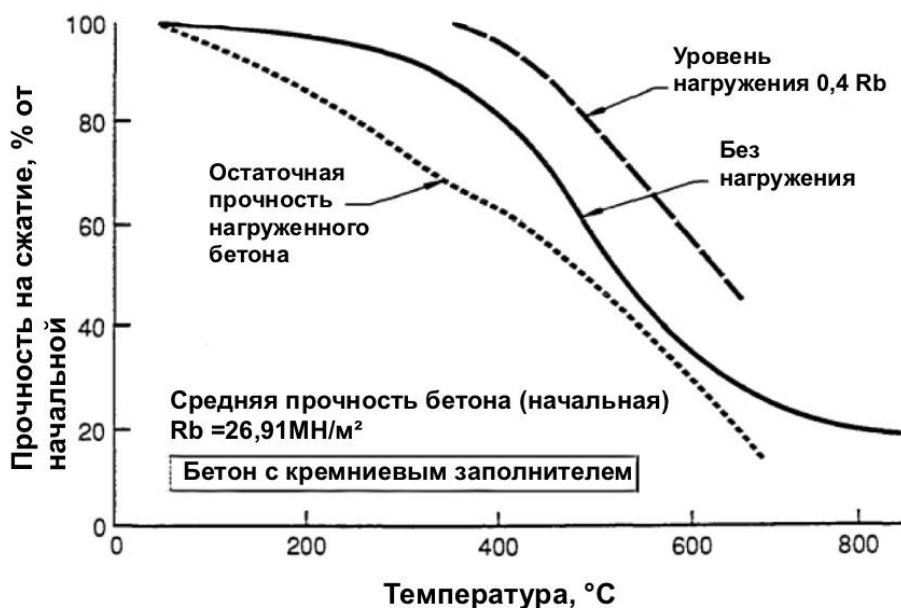


Рис.3. Прочность бетона на сжатие с кремниевым заполнителем при повышенных температурах и после охлаждения
Figure 3. Compressive strength of silicon aggregate concrete at elevated temperatures and after cooling

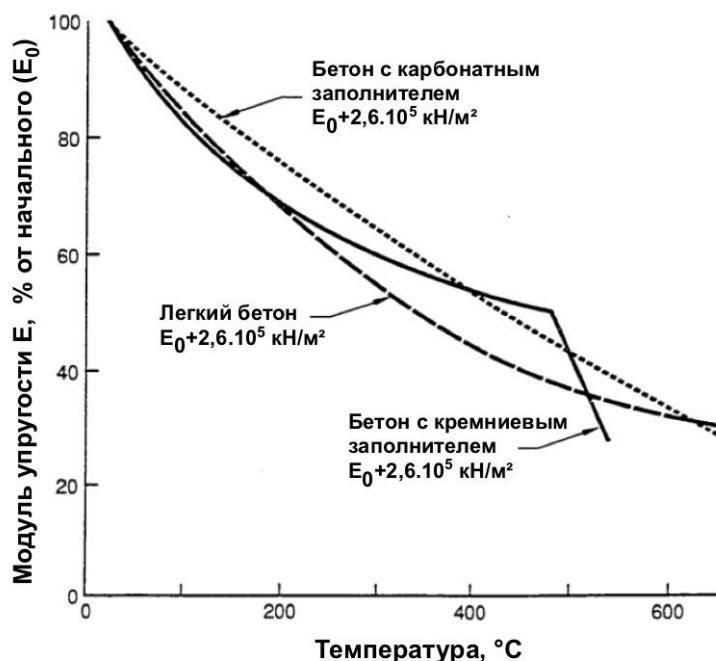


Рис.4. График зависимости модуля упругости бетона от температуры
 Figure 4. Graph of the dependence of the modulus of elasticity of concrete on temperature

Видно, что значительного ухудшения прочности и жесткости бетона не происходит до тех пор, пока температура не достигнет примерно 200°C или выше, в этот момент модуль составляет примерно 75 % от своего нормального значения при температуре (20°C) и прочность составляет около 90 % от нормальной прочности. Прочность на сжатие бетона при кратковременном воздействии температуры до 500°C в основном восстанавливается после охлаждения. Хотя бетон, подвергающийся длительному воздействию температуры выше 100°C, может потерять до 10% своей прочности, нет никаких доказательств того, что длительное воздействие на бетон при умеренных температурах (скажем, 65°C) приводит к его разрушению при сжатии. Однако термоциклирование может быть более разрушительным, чем постоянное повышение температуры той же величины. Ухудшение прочности структурных компонентов бетона из-за этого источника имеет малую вероятность, и в большинстве случаев им можно пренебречь.

Ползучесть и усадка

Ползучесть относится к накопленной деформации бетона под напряжением и может вызвать растрескивание массивного бетона при изменении температуры и увеличении деформации. Изменения объема из-за усадки вызваны главным образом сушкой и продолжающейся гидратацией. Ползучесть/усадка является основным источником потери предварительного напряжения в железобетонных конструкциях. Но ни ползучесть, ни усадка не влияют на несущую способность конструкции в условиях, близких к предельным. Ползучесть и усадка могут быть важны для предельных состояний пригодности к эксплуатации.

Механизмы деградации арматуры

Коррозия

Хотя коррозия может быть проблемой как для обыкновенной стержневой арматуры, так и для предварительно напряженных элементов, это менее вероятно для напрягаемых элементов, поскольку они обычно содержатся в каналах, заполненных цементным раствором или антикоррозионной смазкой под давлением. В некоторых конструкциях, например, на АЭС, проволоки периодически проверяют на наличие коррозии. В сильно армированных сечениях там, где бетон труднее всего уплотнить должным образом, арматура может быть подвержена коррозии.

Защита арматуры от коррозии включает физический и химический барьер. Физический барьер связан с толщиной защитного слоя бетона и наличием трещин. Химический барьер возникает из-за щелочности бетона на портландцементе, который пассивирует поверхность армирования и обеспечивает естественный барьер против коррозии. Для возникновения коррозии должны присутствовать как вода, так и кислород. Присутствие хлоридов в сочетании с относительно высокой влажностью бетона может вызвать ускорение скорости активной коррозии до такой степени, что уже через несколько лет она может стать серьезной структурной проблемой. Объем продуктов коррозии в этом случае в несколько раз больше, чем у некорродированной стали. Силы растяжения, возникающие в бетоне из-за объемного расширения корродирующей стали, вызывают растрескивание и последующее разрушение защитного слоя бетона, а также снижение несущей способности конструкции в зависимости от площади, утраченной в результате коррозии, арматуры. Продукты коррозии также могут вызвать ухудшение сцепления между арматурой и бетоном.

Карбонизация

Проникновение в бетон атмосферного углекислого газа снижает естественную щелочность бетона. Когда проникновение достигает армирования, оно разрушает пассивный оксидный слой, защищающий армирование, и позволяет инициировать активную коррозию. Карбонизация в основном является процессом, контролируемым диффузией. Глубина карбонизации, $x(t)$, определяется как (4):

$$x(t) = K\sqrt{t}, \quad (4)$$

где t - прошедшее время, K - константа, зависящая от состава бетона и концентрации углекислого газа в окружающей среде.

Если бетон защищен от дождя, K оценивается по формуле [3]

$$K = 26(w/c - 0,3)^2 + 1,6 \quad (\text{мм/год}), \quad (5)$$

где w/c - водоцементное отношение бетона.

Карбонизация обычно протекает медленнее, чем хлоридная или другая агрессивная ионная атака; однако внутренние конструкции в относительно теплой среде с низкой влажностью могут быть восприимчивы к нему.

Образование трещин в железобетонных конструкциях мало влияет на прочность бетона на сжатие. Однако углекислый газ из воздуха легче проникает в бетон через трещину, и период начала карбонизации резко сокращается. В этом случае глубина карбонизации трещины определяется из (6)

$$x(t) = 50\sqrt{\omega}\sqrt[4]{t}, \quad (\text{мм}) \quad (6)$$

где ω - ширина трещины (мм).

Хлоридо-ионная атака

Ионы хлора могут присутствовать в результате использования противогололедных солей, природных компонентов некоторых заполнителей и химических примесей. Скорость проникновения, по-видимому, контролируется диффузией. Диффузию ионов хлора на глубину армирования можно предсказать по [4,7,18]

$$\frac{C}{C_s} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right), \quad (7)$$

где C - концентрация хлоридов для инициирования коррозии, C_s - содержание хлоридов на поверхности, D - коэффициент диффузии для хлоридов и $\operatorname{erf}(\square)$ - функция ошибки. Существует большая неопределенность в значении коэффициента диффузии [15].

Установив C равной критической концентрации для инициирования, это уравнение можно решить для времени инициирования t_i , необходимого для депассивации поверхности армирования. Или (8)

$$x(t) = K\sqrt{t}, \quad (8)$$

где $x(t)$ - глубина проникновения ионов хлора, а K - константа, зависящая от проницаемости и влажности бетона и концентрации ионов хлора.

Активная коррозия начинается, как только арматура достигает уровня карбонизации или проникновения агрессивных ионов. После начала активной коррозии скорость коррозии r_c зависит от тока коррозии, площади анодов, относительной влажности и температуры [3]. Глубина проникновения активной коррозии $x(t)$ определяется как (9)

$$x(t) = r_c \cdot t. \quad (9)$$

Если время распространения оценивается как время, необходимое для отслаивания защитного слоя бетона, период активной коррозии t_p определяется как (10)

$$t_p = k_a \cdot c, \quad (10)$$

где c - покрытие арматуры и k_a - константа. Тогда общий срок службы t будет [7]

$$t = t_i + t_p = K \cdot c^2 + k_a \cdot c, \quad (11)$$

где t_i - время, необходимое для начала активной коррозии.

В большинстве случаев t_p существенно меньше t_i . Уровень неопределенности в t_p значительно выше, чем в t_i .

Было предложено [4], что срок службы бетона следует рассматривать как время, необходимое для начала коррозии. Это особенно важно для предварительно напряженных арматурных стержней, где из-за их относительно небольшой площади начало активной коррозии означает неизбежное окончание их срока службы. Было показано, что скорость проникновения ионов хлорида через бетон выше, чем при других распространенных процессах разложения, таких как выщелачивание, воздействие сульфатов. В исследовании по определению долговечности железобетонных хранилищ отходов с минимальным планируемым сроком службы 500 лет время, необходимое для проникновения ионов хлорида до уровня армирования, было принято в качестве консервативного критерия разрушения [22]. Аналогичные предложения были сделаны для прогнозирования долговечности железобетонных конструкций в морской среде. Однако в этом исследовании влияние коррозии на прочность конструкции должно быть определено более точно.

Эффекты повышенной температуры

Предел текучести, предел прочности и модуль упругости стальной арматуры уменьшаются при повышенных температурах, (см.рис.5 и рис.6).

Однако снижение незначительно при нормальных температурных условиях 65°C и ниже; даже при температуре 200°C снижение прочности составляет порядка 10%. Таким образом, при анализе надежности можно не учитывать влияние повышенных температур.

Потеря предварительноного напряжения

Деградация системы постнатяжения является общепризнанной проблемой в предварительно напряженных железобетонных конструкциях. В некоторых сооружениях, например, на АЭС, необходим периодически осмотр преднапряженной арматуры. Водородное охрупчивание или коррозионное растрескивание под напряжением, разрушение бетона под анкерами, ослабление проволоч и их микробиологическая коррозия — все это возможные механизмы деградации. Потеря предварительного напряжения существенно не изменяет предельную несущую способность железобетонного элемента, однако она изменяет напряженно-деформационные характеристики и

механизмы сопротивления нагрузкам при нагрузках меньше предельных и увеличивает вероятность образования трещин, с последующей коррозией арматуры и протечек.

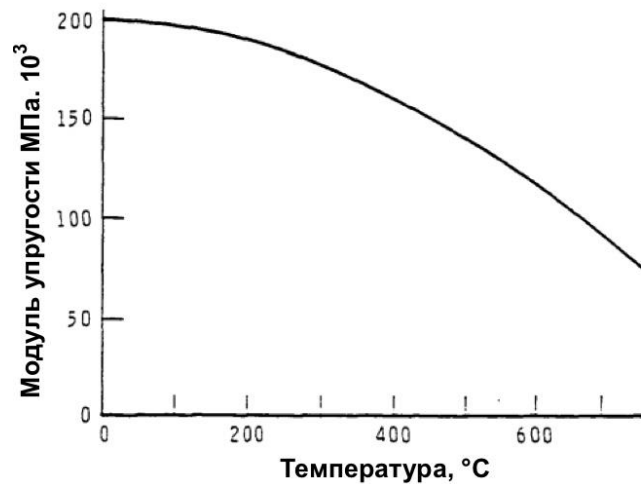


Рис.5. График зависимости модуля упругости арматуры при повышенных температурах
Figure 5. Graph of elasticity modulus of reinforcement at elevated temperatures

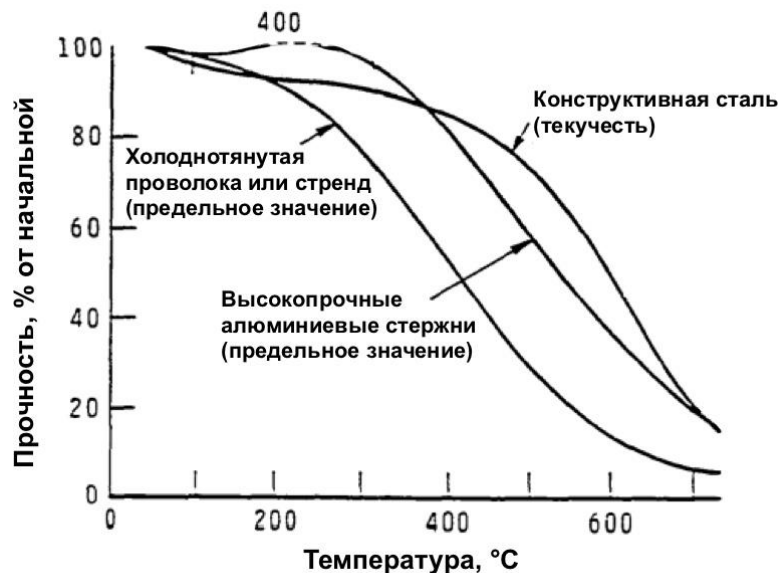


Рис.6. Прочность некоторых сталей при высоких температурах
Figure 6. Strength of some steels at high temperatures

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Некоторые факторы окружающей среды могут оказывать значительное влияние на зависящую от времени надежность железобетонных конструкций, поэтому это следует учитывать при оценке их состояния. В последующем анализе надежности подчеркиваются те механизмы, которые могут вызвать износ элемента, который может быть незаметен при визуальном осмотре. Источники атаки, которые проявляют незначительные поверхностные повреждения, не будут рассматриваться. Предполагается, что такие повреждения будут очевидны при эксплуатационном осмотре и при необходимости могут быть легко устранены.

В общем, глубину атаки или износа $x(t)$ можно смоделировать с помощью

$$x(t) = \begin{cases} 0; t < t_l \\ K(t - t_l)^a; t \geq t_l \end{cases} \quad (12)$$

где t_i - время индукции, необходимое для инициирования деградации, K - параметр скорости, зависящий от агрессивного фактора и характеристик бетона на месте строительства, α - зависит от основного характера воздействия. Эта кинетическая модель носит в основном эмпирический характер, с константами, которые должны определяться характером процесса деградации. Если диффузионный процесс контролируемый, $\alpha = 0,5$; если процесс строго контролируется скоростью, то $\alpha = 1$.

Сульфатная атака:

$$x(t) = Kt^\alpha; \alpha \geq 1. \quad (13)$$

Выщелачивание гидроксида кальция:

$$x(t) = K \cdot t. \quad (14)$$

Карбонизация или хлоридная атака:

$$x(t) = K\sqrt{t}. \quad (15)$$

Конечно, константа K в каждом случае будет разной. Эти соотношения используются для определения зависимости прочности конструкции от времени при анализе надежности. Снижение прочности компонентов бетона как функция времени вычисляется непосредственно из $x(t)$. Случайный характер параметра скорости K рассматривается при моделировании структурных компонентов деградации.

Для некоторых механизмов период инициации может составлять значительную часть срока службы. Таким образом, пренебрежение t_i может привести к чрезмерно консервативной оценке вероятности отказа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка состояния и анализ надежности в зависимости от времени требуют вероятностных описаний нагрузок и прочности конструкции. Некоторые статистические данные, необходимые для поддержки этой методологии, собраны в предыдущих исследованиях по разработке основанных на вероятности требований к проектированию обычных зданий и конструкций атомных электростанций. Следует отметить, что изменения прочности железобетонных конструкций с течением времени из-за старения и воздействия агрессивных факторов не учитывались в предыдущих исследованиях для разработки критериев проектирования, основанных на вероятности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vora J.P. et al. Nuclear Plant Aging Research (NPAR) Program Plan. NUREG-1144, Rev.2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1991.
2. Washa G.W., Saemann J.C., Gramer S.M. Fifty-year Properties of Concrete Made in 1937 // ACI Materials Journal. 1989. Vol. 86, №4, 1989, pp. 367-371.
3. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute Report 4-82, Stockholm, 1982, 469 pp.
4. Clifton J.R., Knab L.I. "Service life of Concrete". NUREG / CR-5466, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, November, 1989.
5. American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)*. American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.
6. American Concrete Institute. *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349)*. American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.
7. Vesikari E. "Service Life of Concrete Structures with Regard to Corrosion of Reinforcement". Research Reports, Technical Research Center of Finland, Espoo, August. 1988.
8. Ellingwood B., MacGregor J. G., Galambos T.V., Cornell C.A. Probability Based Load Criteria: Load Factors and Combinations // Journal of Structural Division, ASCE. 1982. Vol.108, №5, pp.978-997.
9. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98.

10. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С.19-26.
11. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 4 (80). С. 128-137.
12. Kahle W., Mercier S., Paroissin C. Degradation Processes in Reliability. Wiley, Hoboken, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781119307488>
13. Li Q., Wang C., Ellingwood B. R. Time-dependent reliability of aging structures in the presence of non-stationary loads and degradation // Structural Safety. 2015. 52(PA), pp. 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.10.003>
14. Basheer P.A.M. Durability of Concrete Structures. In Proceedings of the Sixth International Conference (ICDCS2018), University of Leeds, Leeds, UK, 18–20 July 2018; Whittles Publishing Ltd.: Dunbeath, UK, 2018.
15. Тамразян А.Г. Вероятностный метод расчета долговечности железобетонных конструкций, подверженных воздействию хлоридов // В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2021. Сборник докладов Второй Национальной научной конференции. Москва, 2022. С. 100-106.
16. Tang L., Nilsson L.O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field // ACI Mater. J. 1992, Vol. 81, 49–53.
17. Abrams M.S. “Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600°F ” Temperature and Concrete, ACI SP-25, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1971. pp.33-58.
18. Walton J.C., Plonsky L.E., Smith R.W. “Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal”. NUREG/CR-5542, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1990.
19. Тамразян А.Г., Mineev M.S., Zhukova L.I. Influence of chloride corrosion on probabilistic assessment of bearing capacity of beamless slabs overlap // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XXVIII R-P-S Seminar 2019. 012052.
20. Clarc L.A. “Structural Aspects of Alkali-silica Reaction”. Structural Engineering Review 2, Chapman and Hall, 1990, pp.81-87.
21. Brouwers H.J.H., Van Eijk R.J. Alkali concentrations of pore solution in hydrating OPC // Cem. Concr. Res. 2003. Vol. 33. Pp. 191–196.
22. Philipose, K.E., et al. Durability Prediction from Rate of Diffusion Testing of Normal Portland Cement, Fly Ash and Slag Concrete // In Durability of Concrete (V.M. Malhotra, ed.) ACI SP-126, American Concrete Institute. pp.335-354.

REFERENCES

1. Vora J.P. et al. Nuclear Plant Aging Research (NPAR) Program Plan. NUREG-1144, Rev.2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1991.
2. Washa G.W., Saemann J.C., Gramer S.M. Fifty-year Properties of Concrete Made in 1937. *ACI Materials Journal*. 1989. Vol. 86, №4, 1989, pp. 367-371.
3. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute Report 4-82, Stockholm, 1982, 469 pp.
4. Clifton J.R., Knab L.I. Service life of Concrete. NUREG / CR-5466, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, November, 1989.
5. American Concrete Institute. Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89). American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.
6. American Concrete Institute. Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349). American Concrete Institute, Detroit, MI, 1989.
7. Vesikari E. “Service Life of Concrete Structures with Regard to Corrosion of Reinforcement”. Research Reports, Technical Research Center of Finland, Espoo, August. 1988.
8. Ellingwood B., MacGregor J. G., Galambos T.V., Cornell C.A. Probability Based Load Criteria: Load Factors and Combinations. *Journal of Structural Division*. 1982. Vol.108, №5, pp.978-997.
9. Тамразян А.Г., Matseevich T.A. Analysis of the reliability of a reinforced concrete slab with corroded reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2022. No. 1 (99). pp. 89-98.
10. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2019. No. 2. Pp.19-26.
11. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 4 (80). С.128-137.
12. Kahle W., Mercier S., Paroissin C. Degradation Processes in Reliability. Wiley, Hoboken, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781119307488>
13. Li Q., Wang C., Ellingwood B. R. Time-dependent reliability of aging structures in the presence of non-stationary loads and degradation. *Structural Safety*. 2015. 52(PA), pp. 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.10.003>

14. Basheer P.A.M. Durability of Concrete Structures. In Proceedings of the Sixth International Conference (ICDCS2018), University of Leeds, Leeds, UK, 18–20 July 2018; Whittles Publishing Ltd.: Dunbeath, UK, 2018.
15. Tamrazyan A.G. Probabilistic method for calculating the durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides. In the proceedings: Actual problems of the construction industry and education - 2021. Collection of reports of the Second National Scientific Conference. Moscow, 2022, pp. 100-106.
16. Tang L., Nilsson L.O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. *ACI Mater. J.* 1992, Vol. 81, 49–53.
17. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to $1600^{\circ}F$. Temperature and Concrete, ACI SP-25, American Concrete Institute, Detroit, MI,1971. pp.33-58.
18. Walton J.C., Plansky L.E., Smith R.W. Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal. NUREG/CR-5542, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC,1990.
19. Tamrazyan A.G., Mineev M.S., Zhukova L.I. Influence of chloride corrosion on probabilistic assessment of bearing capacity of beamless slabs overlap. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XXVIII R-P-S Seminar 2019. 012052.
20. Clarc L.A. Structural Aspects of Alkali-silica Reaction. Structural Engineering Review 2, Chapman and Hall, 1990, pp.81-87.
21. Brouwers H.J.H., Van Eijk R.J. Alkali concentrations of pore solution in hydrating OPC. *Cem. Concr. Res.* 2003. Vol. 33. Pp. 191–196.
22. Philipose, K.E., et al. Durability Prediction from Rate of Diffusion Testing of Normal Portland Cement, Fly Ash and Slag Concrete. In proceedings Durability of Concrete (V.M. Malhotra, ed.) ACI SP-126, American Concrete Institute. pp.335-354.