



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.2.22-34

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Усталостное поведение изгибаемых железобетонных балок при коррозии

А.Г. Тамразян^{1*}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

* tamrazian@mail.ru

Ключевые слова: усталостная прочность, срок службы, изгиб, железобетонные балки, коррозия, частота, гистерезис, выемка, выступы арматуры

История статьи

Поступила в редакцию: 06.04.2024

Доработана: 07.05.2024

Принята к публикации: 15.05.2024

Для цитирования

Тамразян А.Г. Усталостное поведение изгибаемых железобетонных балок при коррозии // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 22–34.

Аннотация. Статья посвящена вопросам усталости изгибаемых железобетонных балок при коррозии арматуры. Рассматриваются влияние выступов и выемки арматуры периодического профиля в бетоне при повторяющихся нагрузках, которые действуют как концентраторы напряжений, что приводит к появлению усталостных трещин и к снижению усталостной прочности. Высота, ширина, угол подъема и радиус основания выступа влияют на величину концентрации напряжения и, следовательно, на усталостную прочность арматурных стержней. Представлена кривая циклических напряжений-деформаций (гистерезиса) для арматуры. После 7% -ной фактической потери массы наблюдается снижение усталостных характеристик балки. Поскольку это уменьшение совпадает с наблюдением питтинга, предполагается, что оно в основном из-за точечной коррозии. Предлагается деформационный подход к выносливости. Выведена зависимость между деформацией и сроком службы элемента. Показано, что коэффициент усталостной прочности стальной арматуры в балках увеличивается с увеличением глубины выемки, а контролирующим коэффициентом усталостной прочности балок является усталостная прочность стального стержня.

Fatigue Behavior of Flexural Reinforced Concrete Beams under Corrosion Conditions

Ashot G. Tamrazyan^{1*}

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

* tamrazian@mail.ru

Keywords: fatigue resistance, service life, bending, reinforced concrete beams, corrosion, frequency, hysteresis, hollowing, lugs of the reinforcement

Abstract. The article is devoted to the fatigue of bending reinforced concrete beams under reinforcement corrosion. The influence of lugs and rebar notches periodic profile in concrete under repetitive loads, which act as stress concentrators, leading to the appearance of fatigue cracks and to the reduction of fatigue strength, is considered.

Ашот Георгиевич Тамразян, чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, 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

© Тамразян А.Г., 2024



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

Article history

Received: 06.04.2024

Revised: 07.05.2024

Accepted: 15.05.2024

For citation

Tamrazyan A.G. Fatigue Behavior of Flexural Reinforced Concrete Beams under Corrosion Conditions. *Reinforced concrete structures*. 2024; 2(6):24-36.

The height, width, elevation angle and radius of the base of the lugs affect the magnitude of stress concentration and hence the fatigue strength of the reinforcement bars. A cyclic stress-strain (hysteresis) curve for reinforcement is presented. After 7% — actual mass loss, a decrease in the fatigue performance of the beam is observed. Since this reduction coincides with the observation of pitting, it is assumed to be mainly due to pitting. A deformation approach to endurance is proposed. The relationship between deformation and service life of an element is derived. It is shown that the fatigue strength coefficient of steel reinforcement in beams increases with increasing depth of excavation, and the controlling fatigue strength coefficient of beams is the fatigue strength of steel bar.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы коррозии в бетоне часто встречаются в мостах, в парковочных и прибрежных морских сооружениях из-за воздействия на них соли либо из атмосферы, либо из антиобледенителей, используемых в зимний сезон на мостах. Коррозия — одна из самых серьезных проблем, влияющих на срок службы этих конструкций, и полная замена, вероятно, будет стоить намного дороже, чем стоимость обслуживания и ремонта [1].

Поверхностные концентраторы напряжений являются основными факторами снижения коррозионной стойкости стержней. Длительная сохранность арматуры в бетонах определяется изолирующим действием бетона, зависящим от плотности его структуры и толщины слоя, химического состава цементного камня, и условиями эксплуатации конструкций. Однако ни одна из характеристик проницаемости бетона не гарантирует длительного защитного действия бетона по отношению к арматуре.

Повторяющаяся нагрузка вызывает разрушение конструкции усталостью, даже если приложенная нагрузка значительно ниже статической прочности ее элементов. Усталость при повторяющейся нагрузке может возникнуть для любой конструкции, будь то корродированная или нет. Сочетание усталости и коррозии приводит к значительному снижению уровня усталостной прочности. Однако пока недостаточно исследований об усталостном поведении корродированных железобетонных конструкций.

Усталость железобетонных конструкций

Усталость — это повреждение из-за образования и роста трещин, вызванных повторными приложениями нагрузки, которые недостаточны для того, чтобы вызвать разрушение с помощью одноразового приложения [2]. Большинство материалов при циклической нагрузке выдерживают меньшее напряжение, чем когда подвергаются статической нагрузке. Усталостная прочность зависит от уровня напряжений, скорости нагружения, отношения напряжений (отношение минимального напряжения к максимальному), среднего напряжения и количества циклов нагружения [3, 4, 5]. Прежде чем оценивать усталостное поведение железобетонных конструкций, рассмотрим поведение бетона и стальной арматуры.

Бетон

Поведение обычного бетона при циклической усталостной нагрузке характеризуется появлением и ростом трещин, которые могут привести к полному разрушению после достаточного количества повторений нагрузки.

Усталостная прочность снижается с увеличением количества циклов. Обычный бетон до 10 миллионов циклов не имеет предела выносливости, а кривая $S-N$ между 10^2 и 10^7 циклами является линейной в логарифмическом масштабе. Циклические испытания на усталостное внецентренное сжатие, проведенные на призмах из обычного бетона, показали, что усталостная прочность увеличивается по мере увеличения эксцентриситета. Предполагается, что это

увеличение связано с тем, что градиент напряжений замедляет рост внутренних микротрещин.

Испытания показали, что частота нагружения не влияет на усталостную прочность простого бетона при условии, что частота циклических нагрузок находится в диапазоне от 1,0 до 15 Гц, а максимальное напряжение не превышает 75 % от статической прочности [2]. Однако при более высоких уровнях напряжения частота нагружения оказывает значительное влияние. При снижении частоты нагружения эффект ползучести становится значительным, что приводит к снижению усталостной прочности.

Диаграмма Гудмана — это наиболее удобное представление испытания на усталостную долговечность. Она используется для прогнозирования усталостной долговечности при заданном соотношении напряжений (переменные и средние напряжения) на основе свойств материала (предельная прочность S_{ut} и выносливость S_e). При этом учитывается геометрия образца и состояние его поверхности. Модифицированная диаграмма Гудмана для стали показана на рис. 1.

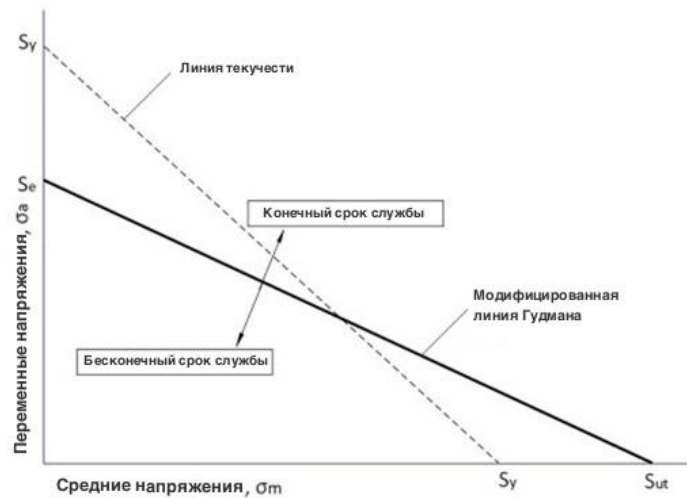


Рис. 1. Представление модифицированной диаграммы Гудмана
 Fig. 1. Representation of a modified Goodman diagram

Поскольку у обычного бетона нет предела усталости, проектировщики обычно оценивают усталостную прочность при заданном количестве циклов, используя диаграмму Гудмана для бетона, показанную на рис. 2 [2, 6].

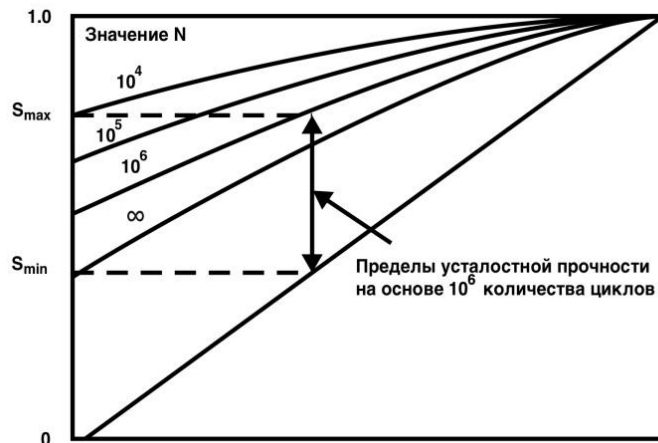


Рис. 2. Диаграмма Гудмана для бетона [2]

Fig. 2. Goodman diagram for concrete [2]

Следует отметить, что диаграмму Гудмана можно использовать независимо от того, какой режим нагружения – растяжение, сжатие или изгиб, поскольку усталостная прочность (выраженная в процентах от соответствующей статической прочности) бетона практически одинакова для трех режимов нагружения [2, 6].

Арматурная сталь

Выступы арматуры в бетоне при повторяющихся нагрузках действуют как концентраторы напряжений, что приводит к появлению усталостных трещин, к снижению усталостной прочности. В испытаниях было показано, что стержни в бетоне при наличии хорошего сцепления между сталью и бетоном демонстрируют более высокую усталостную прочность, чем стержни, находящиеся в воздухе [7, 8]. Основные переменные, влияющие на усталостную прочность деформированных стержней, включают средний и минимальный уровень напряжения, диаметр стержня, тип стержня и геометрию выступов [2]. Скорость нагружения, предел текучести и температура практически не влияют на усталостную долговечность арматурной стали. Диаметр и тип стержня связаны между собой, поскольку стержни, заделанные в бетонные балки, имеют градиент напряжения по всей длине стержня. Стержни с большим диаметром в тонких балках или плитах могут иметь значительно более высокие напряжения на концах пролета, чем в середине. Это приводит к увеличению надежности, срока службы стержней с малым диаметром по сравнению со стержнями большого диаметра [2, 9]. Обычно наблюдается, что при одинаковом уровне напряжения с увеличением диаметра стержня усталостная долговечность уменьшается [10].

Высота, ширина, угол подъема и радиус основания выступа влияют на величину концентрации напряжения и, следовательно, на усталостную прочность арматурных стержней. Испытания показали, что с увеличением отношения радиуса основания к высоте выступа усталостная прочность заметно возрастает до отношения 1,0. Уменьшение угла наклона выступа стержня по отношению к продольной оси также повышает усталостную прочность. На основании аналитических исследований при проектировании конструкций рекомендуется использовать коэффициент концентрации напряжений между 1,5 и 2,0 [2].

Влияние среднего напряжения иногда упускается из виду, и основное внимание обычно уделяется уровню напряжений. Однако показано, что увеличение среднего напряжения при растяжении приводит к снижению усталостной долговечности (выносливости) [10].

Влияние минимального уровня напряжения на усталостную прочность арматурных стержней не очень хорошо понимается из-за противоречивых результатов разных исследователей. Некоторые исследователи пришли к выводу, что минимальный уровень напряжения не влияет на усталостную долговечность, в то время как другие пришли к выводу, что усталостная прочность уменьшается с увеличением минимального уровня напряжения пропорционально отношению изменения минимального уровня напряжения к прочности арматурных стержней на растяжение.

Железобетонные элементы

Характеристики железобетонной балки зависят от совместного действия арматуры и бетона. Для недостаточно армированных железобетонных балок усталостные характеристики в основном определяются сталью. Сильно армированные железобетонные балки могут разрушаться при изгибе или сдвиге в зависимости от того, какая прочность бетона или стали является критической. Усталостное разрушение не всегда происходит по тому же механизму, что и статическое разрушение [7].

В [2] содержатся два требования к проектированию железобетонных конструкций при усталости:

- уровень напряжений в бетоне не должен превышать 40 % его прочности на сжатие;
- уровень напряжений в стали не должен превышать значения, $S_r = 160 - 0,33 S_{\min} < 140$ МПа, где S_r — допустимый уровень напряжений и S_{\min} — минимальное напряжение.

Первое требование заключается в том, чтобы гарантировать, что бетон выдержит не менее 10 миллионов циклов, а второе — консервативная нижняя граница всех доступных результатов испытаний на арматурных стержнях.

Влияние коррозии на железобетонные балки

Потеря средней площади поперечного сечения арматуры наиболее часто используется в качестве метода для измерения степени коррозии. В железобетоне максимальная скорость коррозии стали около 50 м/год.

Основной урон происходит не от потери стали, а от расширения объема продуктов ржавчины, что приводит к растрескиванию и отслаиванию бетона и, следовательно, к потере связи между бетоном и сталью [11, 12, 13].

Объем продуктов ржавчины намного больше, чем исходный объем потребляемого железа во время реакции коррозии [14]. Поскольку большая часть ржавчины ограничена бетоном, его образование создает растягивающие напряжения, которые могут в конечном итоге превысить предел прочности бетона. Следовательно, повреждение сначала наблюдается как пятна ржавчины и мелкое растрескивание по бетонной поверхности. Эти трещины развиваются параллельно арматуре. Было высказано предположение, что трещины в бетоне возникают, когда толщина слоя ржавчины вокруг стали превышает 0,1–0,2 мм [12]. Если ремонт на этом раннем этапе не проводится, коррозия будет возрастать до тех пор, пока трещины позволяют мигрировать больше кислорода и воды к стали. Это приводит к серьезному повреждению, включая полную потерю связи между бетоном и сталью из-за расслаивания и отслаивания, а также к уменьшению ее площади поперечного сечения до такой степени, что железобетонные конструкции могут стать небезопасными [12].

Влияние коррозии на усталость

Испытания на равномерно корродированных стержнях не показали явного снижения усталостных характеристик, пока сокращение площади было небольшим [6]. Аналогичное наблюдение было отмечено в [15]. В [16] объяснили, что продукты ржавчины заполняют трещины в стали при растяжении и, таким образом, усиливают напряжение закрытия трещины и уменьшают уровень напряжений в стальной арматуре. Однако авторы заметили, что это явление происходит при низкой частоте. Когда балки испытывались на более высоких частотах (от 3 до 5 Гц), трещины при растяжении не закрывались продуктами коррозии, и поэтому отмечалось лишь незначительное снижение выносливости. С другой стороны, при больших потерях коррозионной массы, особенно в случае питтинговой коррозии, вызванной хлоридами, снижение усталостной прочности достигало до 37 % [10]. Снижение усталостной прочности получается больше, что можно объяснить только уменьшением площади поперечного сечения [16].

В [17] провели всестороннее исследование пятидесяти балок, испытанных при циклически усталостной нагрузке частотой 6,7 Гц. Балки были размерами 110 × 380 × 2000 мм, армированные одним стержнем диаметром 24 мм. Переменными параметрами были тип стали (горячекатаные или холоднодеформированные), условия испытания (на воздухе, в морской воде и в 3%-ном растворе хлорида натрия) и уровень напряжения в стали. По результатам экспериментальных данных авторы пришли к выводу, что:

- балки из обоих типов стали показали предел усталости при испытании на воздухе, причем предел усталости холоднодеформируемых стержней был меньше, чем горячекатаных;

- холоднодеформируемые стержни при испытании в морской воде имели более низкий предел усталости, чем при испытании на воздухе;
- для горячекатаных стержней, погруженных в морскую воду или раствор хлорида, предел усталости не наблюдается вплоть до 10^7 циклов. Кривые «напряжение – срок службы» этих двух групп были почти параллельны и имели значительно более высокий наклон, чем у стержней, испытанных в воздухе по логарифмической шкале;
- сокращение усталостной долговечности в корродированных стержнях связано с тем, что коррозионные ямы становятся местами зарождения усталостных трещин, а коррозионная среда увеличивает скорость их роста;
- у балок, испытанных в 3%-ном растворе хлорида, усталостная прочность снизилась более чем на 30 МПа по сравнению с балками, испытанными в морской воде. Это наблюдение позволяет предположить, что хлоридная среда более агрессивная, чем морская вода, и поэтому конструкции, подвергающиеся воздействию антиобледенительных реагентов, находятся в более суровых условиях, чем погруженные в морскую воду.

Агрессивные среды оказывают серьезное влияние на усталостные характеристики элементов конструкций. Чтобы избежать усталостных разрушений в агрессивных средах, предел усталости конструкции снижают [18]. Например, в [6] рекомендуется коэффициент снижения прочности 1,7 для высоких уровней коррозии (более 25 % уменьшение площади поперечного сечения стали) и 1,35 для уровня коррозии менее 25 %.

Рекомендации по проектированию железобетонных балок при усталостном нагружении

Уровень напряжений является наиболее важным фактором для усталости железобетонных конструкций. Общий подход к усталости — это определение уровня напряжений в каждом из материалов (бетона и арматуры) из-за усталостных нагрузок и проверка уровня напряжений на допустимые пределы. В [2] определяется допустимый уровень напряжения усталости для бетона и арматурной стали на основе экспериментальных данных. Расчеты фактического уровня напряжений выполняются с использованием методов анализа нормального сечения под действием максимальной и минимальной нагрузки на усталость. Этот критерий в расчете суммируется следующим образом:

- уровень напряжений в бетоне не должен превышать $0,4R_b$, когда минимальное напряжение равно нулю;
- уровень напряжений в линейно деформированной арматуре S_f не должен превышать $(160 - 0,33S_{\min})$ МПа, где S_{\min} — минимальное напряжение. Для изгибаемых стержней уровень напряжений, вычисленный из этого отношения, должен быть уменьшен на 50 процентов.

МЕТОД

Анализ усталости: деформационный подход к выносливости

Предлагаемый подход к анализу усталости основан на характеристиках арматурных стержней. Арматура, используемая в железобетонных балках, обычно представляет собой деформированные стержни с ребрами. Было отмечено, что ребра действуют как усилители напряжений и приводят к концентрации напряжений у основания ребер [19, 20]. При высоких уровнях напряжений в этих ребрах возникает значительная пластичность, что приводит к существенному снижению выносливости стержня. Таким образом, модель усталостного поведения должна учитывать геометрию арматурного стержня в дополнение к номинальным уровням напряжений, приложенных к стали в течение всего срока службы балки. Для описания такого поведения используется деформационный подход. Следует упомянуть, что деформационный подход обычно реализуется в случаях, когда уровни напряжений высоки и

развиты значительные пластические деформации [3]. Деформационный подход непосредственно измеряет и количественно оценивает эти пластические деформации.

Для прогнозирования усталостной долговечности стальных арматурных стержней при использовании деформационного подхода требуется следующая информация [21]:

- свойства стали, полученные в результате лабораторных усталостных данных с контролем деформации гладких образцов (циклическая реакция «напряжения – деформации» и данные о сроке службы);
- история «напряжений – деформаций» в ребрах, полученная от номинальных уровней напряжения, приложенных к стальным арматурным стержням;
- методика учета влияния средних напряжений на выносливость.

Свойства стали

Циклическая кривая «напряжения – деформации» (гистерезис) получена из испытаний гладких образцов при различных уровнях постоянной деформации. После повторных нагрузочных циклов петля гистерезиса стабилизируется. Обычно регистрируются данные о напряжении и деформации при половине усталостного ресурса. Затем определяют точки максимального напряжения и деформации стабилизированных петель гистерезиса (вершины петель) соединяются и формируют циклическую кривую, как показано на рис. 3.

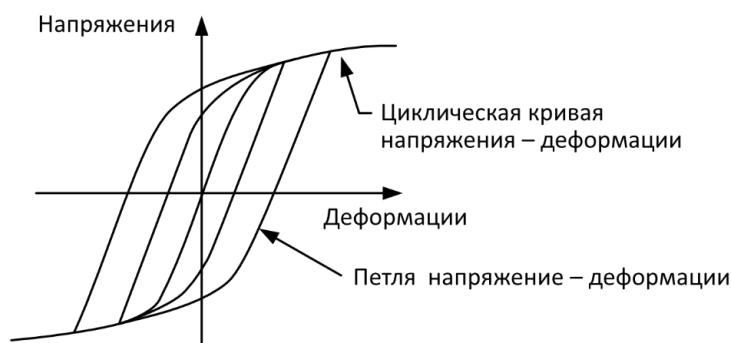


Рис. 3. Циклическая кривая «напряжения – деформации», полученная путем соединения точек максимального напряжения и напряжения стабилизированных контуров гистерезиса [3]

Fig. 3. Cyclic stress-strain curve obtained by connecting the points of maximum stress and stress stabilised hysteresis contours [3]

Циклическая кривая «напряжения – деформации» выражается:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{k'} \right)^{1/n'} \quad (1)$$

где ε и σ — циклическая деформация и напряжение металла соответственно; k' — коэффициент циклической прочности; n' — показатель циклического деформационного упрочнения.

Значения k' и n' определяются путем построения графика зависимости истинного значения циклического напряжения от истинного значения циклической пластической деформации в логарифмической шкале (log-log), как показано на рис. 4. Наклон полученной прямой представляет собой n' , а пересечение представляет k' при деформации, равной единице.

Зависимость между деформацией и сроком службы определяется следующим образом:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon/2$ — значение деформации; σ'_f — усталостная прочность; ε'_f — усталостная пластичность; b — показатель усталостной прочности; c — показатель усталостной упругости; N_f — число циклов до разрушения.

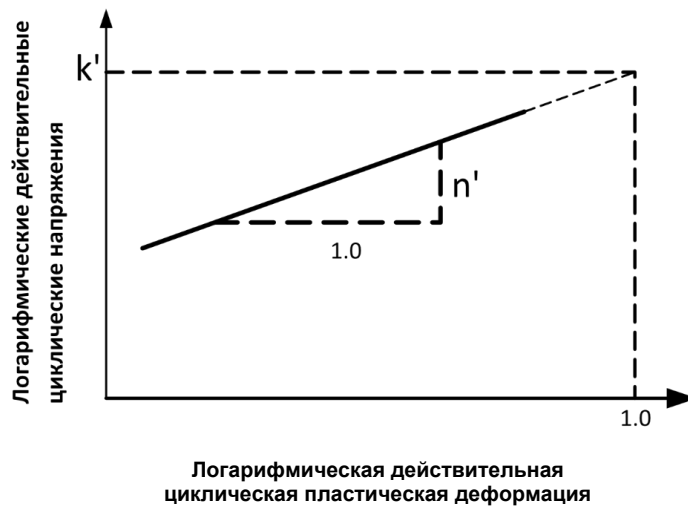


Рис. 4. Поведение циклических напряжений и пластических деформаций в металлах
Fig. 4. Behavior of cyclic stresses and plastic deformations in metals

Первое слагаемое в правой части уравнения «деформация – срок службы» дает упругую часть деформации, а второе — пластическую часть. Эта зависимость схематично показана на рис. 5.

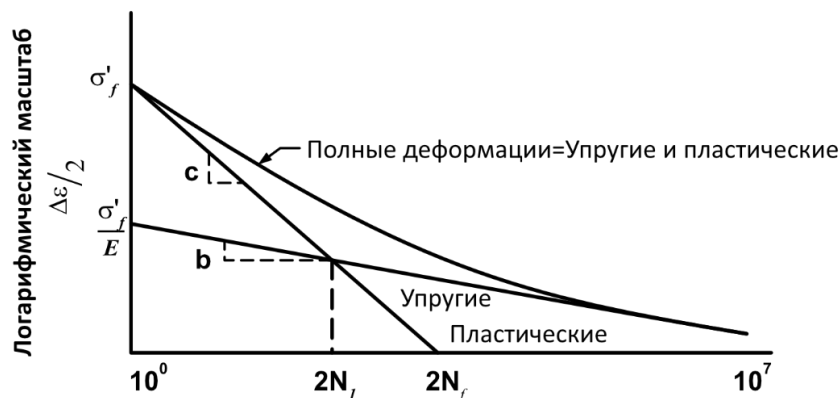


Рис. 5. Зависимость «деформация – срок службы»
Fig. 5. Strain – service life relationship

История «напряжений – деформаций»

Начальный цикл нагрузки

Максимальное номинальное напряжение S_{\max} в арматурном стержне рассчитывается с помощью обычного анализа на изгиб для поперечного сечения с трещиной в середине пролета. Местное напряжение σ_{\max} и местная деформация ε_{\max} в корне выемки (корень ребра), которые удовлетворяют циклической кривой «деформация – напряжения», связаны с макси-

мальным номинальным напряжением с помощью гиперболической зависимости Нейбера (рис. 6), выраженной следующим образом [3].

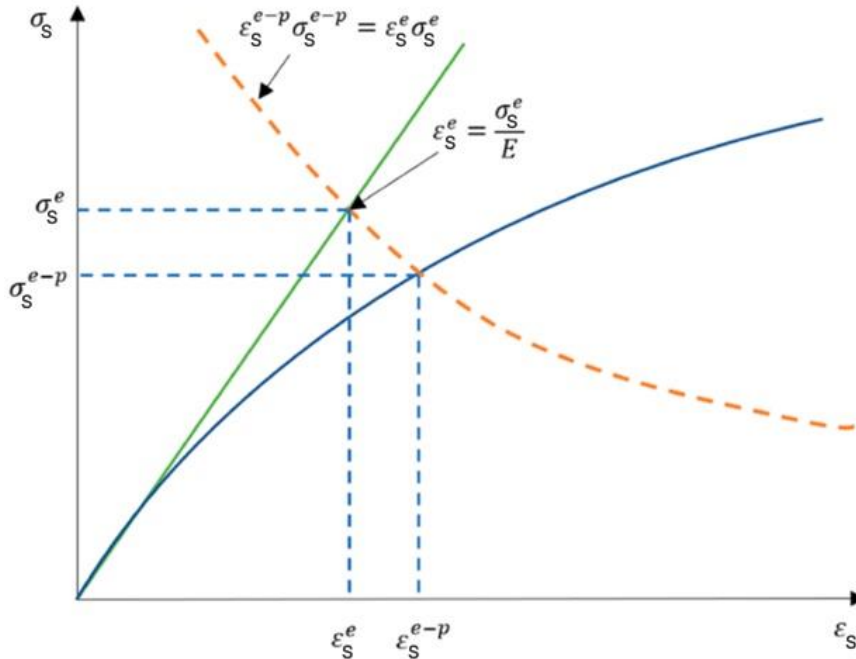


Рис. 6. Гипербола Нейбера вместе с линейной упругопластической моделью (закон Гука) и кривой деформации
Fig. 6. Neuber's hyperbola together with the linear elastic-plastic model (Hooke's law) and the strain curve

Для упругого номинального поведения:

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = \frac{(K_t S_{\max})^2}{E} . \quad (3)$$

Для пластического номинального поведения:

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = (K_t)^2 S_{\max} e_{\max} , \quad (4)$$

где K_t — коэффициент концентрации, равный 2 [2, 19]; e_{\max} — максимальная номинальная деформация; E — модуль упругости стали.

При выводе модели использована гипербола Нейбера вместе с линейной упругопластической моделью (закон Гука) и кривой деформации. Это означает, что можно сформулировать амплитуду упругой деформации с использованием амплитуды упругого напряжения и модуля деформации.

Метод Нейбера позволяет преобразовать фиктивные значения полностью упругого напряжения, полученные с помощью МКЭ, в «реальные» упругопластические значения. Это основное условие для любых вычислений, выполняемых посредством анализа локальной упруго-пластической деформации, за исключением использования анализа переходных процессов [22].

Циклы усталостной нагрузки

После определения максимального и минимального номинальных напряжений S_{\max} и S_{\min} для растянутого стержня из-за усталостной нагрузки рассчитывается номинальный диапазон напряжений ΔS как разность между S_{\max} и S_{\min} . Этот уровень напряжений приводит к изменению местного напряжения $\Delta\sigma$ и соответствует изменению местной деформации $\Delta\varepsilon$ в корне выемки. Изменение местных напряжения и деформаций удовлетворяет кривой «напряжения – деформации» для стали. Основываясь на гипотезе Мазинга, кривая гистерезиса получается удвоением циклической кривой «деформации – напряжения» для стали [3, 23]. Кривая «напряжения – деформации» показана на рис. 7 и выражается следующим образом:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2k'}\right)^{1/n'} \quad (5)$$

где k' — коэффициент циклической прочности; n' — показатель циклического деформационного упрочнения, определяемый из лабораторных испытаний на усталость.

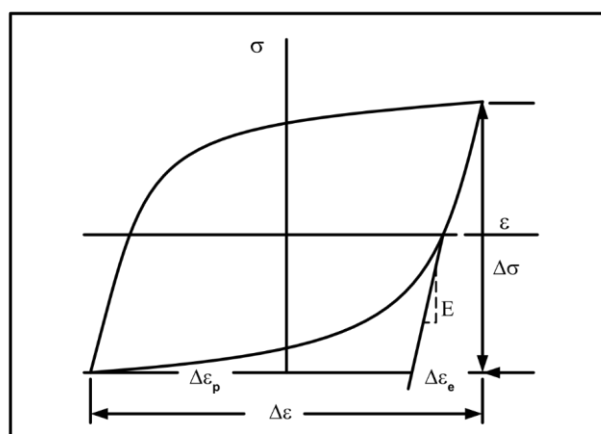


Рис. 7. Цикл гистерезиса
Fig. 7. Hysteresis cycle

Изменения локального напряжения $\Delta\sigma$ и локальной деформации в корне выемки $\Delta\varepsilon$ также удовлетворяют правилу Нейбера в следующем виде:
для упругого номинального поведения:

$$\Delta\sigma\Delta\varepsilon = \frac{(K_t\Delta S)^2}{E} \quad (6)$$

для пластического номинального поведения:

$$\Delta\sigma\Delta\varepsilon = (K_t)^2 \Delta S\Delta\varepsilon \quad (7)$$

где $\Delta\varepsilon$ — номинальное изменение деформации, соответствующее ΔS .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оцененные значения максимального местного напряжения σ_{\max} , изменения местного напряжения $\Delta\sigma$, местная деформация $\Delta\varepsilon$ используются для определения соответствующего усталостного срока службы N_f арматурного стержня. Среднее напряжение учитывается с помощью уравнения [24]:

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c}, \quad (8)$$

где σ'_f , ε'_f , b и c — коэффициенты усталости, ранее определенные для уравнения (2), и определяются по результатам испытаний на усталость. Левая часть уравнения (8) определяется на основе значений максимального местного напряжения σ_{\max} и изменения локальной деформации $\Delta \varepsilon$. Затем усталостная долговечность в правой части повторяется до тех пор, пока обе стороны уравнения не будут равны.

Таким образом, подход, основанный на растяжении, используемый для учета концентрации напряжений, вызванной выемкой на арматурных стержнях, состоит из следующих этапов:

- 1) определить номинальное напряжение, приложенное к растянутой стали с использованием обычного изгибного анализа;
- 2) определить циклическую кривую «напряжения – деформации» и усталостные свойства стали;
- 3) провести анализ Нейбера с использованием номинального напряжения в стали для определения деформаций корней выемки и средних напряжений;
- 4) рассчитать усталостную долговечность для заданных условий, используя зависимость «деформация – срок службы» по формуле (8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сделать следующие выводы относительно усталостных характеристик балок:

- после 7%-ной фактической потери массы наблюдается снижение усталостных характеристик балки. Поскольку это уменьшение совпадает с наблюдением питтинга, предполагается, что оно в основном из-за точечной коррозии;
- наблюдается большой разброс зависимости глубины выемки от теоретической и фактической потери массы. Геометрия выемки в основном влияет на усталостную прочность балки; соответственно, ожидается, что усталостная прочность будет связана с коэффициентом выносливости выемки;
- коэффициент усталостной прочности стальной арматуры в балках увеличивается с увеличением глубины выемки;
- контролирующим коэффициентом усталостной прочности балок является усталостная прочность стального стержня;
- усталостная нагрузка вызвала циклическую ползучесть и размягчение бетона при сжатии и циклическую ползучесть и размягчение стали при растяжении, что приводит к увеличению прогиба балок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hollaway L.C., Leeming M.B.* Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Wood head, Cambridge, England, 1999.
2. ACI Committee 215, 1974, Considerations for design of Concrete Structures Subjected to Fatigue loading (ACI 215R-74 revised 1992 reapproved 1997), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997. 24 p.
3. *Bannantine J., Comer J., Handrock J.* Fundamentals of Metal Fatigue Analysis. Prentice Hall, NJ, 1990.
4. *Мирсаянов И.Т., Тамразян А.Г.* К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 50–56.
5. *Мирсаянов И.Т., Тамразян А.Г.* К расчету железобетонных конструкций на выносливость // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 19–23.
6. Comite Euro- International Du Beton, (CEB) “Fatigue of Concrete Structures: State of the Art Report”, Bulletin № 188, Lausanne, Switzerland, 1988.

7. Barnes R.A., Mays G.C. Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates // *ASCE Journal of Composites for Construction*. 1999. Vol. 3. No. 2. Pp. 63–72.
8. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4 (80). Pp. 128–137.
9. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1 (99). С. 89–98.
10. Tilly G.P. Fatigue of Steel Reinforcement Bars in Concrete : a Review // *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. 1979. Vol. 2. No. 3. Pp. 251–268.
11. ACI Committee 222. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001. 30 p.
12. Bentur A., Diamond S., Berke N.S. Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice. E & FN Spone, London, 1997.
13. 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.
14. Тамразян А.Г., Минеев М.С. К возникновению трещин в модели толстостенного бетонного цилиндра при коррозии с учетом пористой зоны на границе раздела арматуры и бетона // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 3 (393). С. 159–165.
15. Jhamb A.C., MacGregor J.G. Effect of surface Characteristics on Fatigue Strength of Reinforced Steel // *Abeles Symposium: Fatigue of Concrete*. ACI Sp-41, Detroit, MI, 1972. Pp. 139–182.
16. Arthur P.D., Earl J., Hodgkiess T. Corrosion Fatigue in Concrete for Marine Applications. *Fatigue of Concrete Structures*. Shah S.P., ED ACI SP-75, Detroit, MI, 1982. Pp. 1–24.
17. Roper H., Hetherington G.B. Fatigue of Reinforced Concrete Beams in Air, Chloride Solution, and Sea Water. *Fatigue of Concrete Structures*, Shah S.P., ED ACI SP-75, Detroit, MI, 1982. Pp. 307–330.
18. Fib model code for concrete structures // *FIB Model Code*, Lausanne, Switzerland : International Federation for Structural Concrete, 2010.
19. Heffernan P.J., Erki M.A. Fatigue behavior of Reinforced Concrete Beams, Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Plastic Laminates. // *ASCE Journal of Composites for Construction*. 2004. Vol. 8. No. 2. Pp.132–140.
20. Masoud S., Soudki K., Topper T. Postrepair Fatigue Performance of FRP-Repaired Corroded Reinforced Concrete Beams: Experimental and Analytical Investigation // *ASCE Journal of Composites for Construction*. 2005. Vol. 9. No. 5. Pp. 441–449.
21. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
22. Neuber H. Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Non Linear Stress Strain Law // *Journal of Applied Mechanics*. 1961. Pp. 544–550.
23. Masing G. Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing. In *Proc. of 2nd International. Congress of Applied Mechanics*, Zurich, 1926.
24. Smith K.N., Watson P., Topper T.H. A Stress – Strain Function for the Fatigue of Metals // *Journal of Materials (JMLSA)*. 1970. Vol. 5. No. 4. Pp. 767–778.

REFERENCES

1. Hollaway L.C., Leeming M.B. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering, Wood head, Cambridge, England, 1999.
2. ACI Committee 215. Considerations for design of Concrete Structures Subjected to Fatigue loading (ACI 215R-74 revised 1992 reapproved 1997). American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, 1997. 24 p.
3. Bannantine J., Comer J., Handrock J. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. Prentice Hall, NJ, 1990.
4. Mirsayapov I.T., Tamrazyan A.G. To development of scientific bases of the theory of endurance of reinforced concrete structures. *Industrial and civil construction*. 2017. No. 1. Pp. 50-56.
5. Mirsayapov I.T., Tamrazyan A.G. To calculation of reinforced concrete structures for endurance. *Industrial and civil engineering*. 2016. No. 11. Pp. 19-23.
6. Comite Euro- International Du Beton, (CEB). Fatigue of Concrete Structures: State of the Art Report. Bulletin no. 188. Lausanne, Switzerland, 1988.
7. Barnes R.A., Mays G.C. Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates. *ASCE Journal of Composites for Construction*. 1999. Vol. 3. No. 2. Pp. 63-72.
8. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4 (80). Pp. 128-137.
9. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slab with Corroded Reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2022. No. 1 (99). Pp. 89-98.

10. Tilly G.P. Fatigue of Steel Reinforcement Bars in Concrete : a Review. *Fatigue of Engineering Materials and Structures*. 1979. Vol. 2. No. 3. Pp. 251-268.
11. ACI Committee 222. Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001. 30 p.
12. Bentur A., Diamond S., Berke N.S. *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*. E & FN Spone, London, 1997.
13. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and civil engineering*. 2019. No. 2. Pp. 19-26.
14. Tamrazyan A.G., Mineyev M.S. Towards Crack Occurrence in a Model of a Thick-Walled Concrete Cylinder under Corrosion with Consideration of a Porous Zone at the Interface of Reinforcement and Concrete. *Izvestia of higher educational institutions. Technology of textile industry*. 2021. No. 3 (393). Pp. 159-165.
15. Jhamb A.C., MacGregor J.G. Effect of surface Characteristics on Fatigue Strength of Reinforced Steel. *Abeles Symposium: Fatigue of Concrete*. ACI Sp-41, Detroit, MI, 1972. Pp. 139-182.
16. Arthur P.D., Earl J., Hodgkiess T. Corrosion Fatigue in Concrete for Marine Applications. *Fatigue of Concrete Structures*. Shah S.P., ED ACI SP-75, Detroit, MI, 1982. Pp. 1-24.
17. Roper H., Hetherington G.B. Fatigue of Reinforced Concrete Beams in Air, Chloride Solution, and Sea Water. *Fatigue of Concrete Structures*. Shah S.P., ED ACI SP-75, Detroit, MI, 1982. Pp. 307-330.
18. *Fib model code for concrete structures*. FIB Model Code, Lausanne, Switzerland : International Federation for Structural Concrete, 2010.
19. Heffernan P.J., Erki M.A. Fatigue behavior of Reinforced Concrete Beams, Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Plastic Laminates. *ASCE Journal of Composites for Construction*. 2004. Vol. 8. No. 2. Pp. 132-140.
20. Masoud S., Soudki K., Topper T. Postrepair Fatigue Performance of FRP-Repaired Corroded Reinforced Concrete Beams: Experimental and Analytical Investigation. *ASCE Journal of Composites for Construction*. 2005. Vol. 9. No. 5. Pp. 441-449.
21. Tamrazyan A.G. Methodology of analysis and assessment of state reliability and forecasting of service life of reinforced concrete structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023. Vol. 1. No. 1. Pp. 5-18.
22. Neuber H. Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Non Linear Stress Strain Law. *Journal of Applied Mechanics*. 1961. Pp. 544-550.
23. Masing G. *Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing*. In Proc. of 2nd International. Congress of Applied Mechanics, Zurich, 1926.
24. Smith K.N., Watson P., Topper T.H. A Stress – Strain Function for the Fatigue of Metals. *Journal of Materials (JMLSA)*. 1970. Vol. 5. No. 4. Pp. 767-778.