

УДК 624.04

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ КРИВИЗНЫ

Шеин Александр Иванович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Земцова Ольга Григорьевна,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Аннотация

Для тяжело нагруженных железобетонных балок при дополнительном динамическом нагружении имеется опасность достаточно быстрого разрушения. Возникает проблема расчета конструкции в условиях прогрессирующего разрушения. В задачах динамики высоко нагруженных систем в отличие от усталостного трещинообразования, начало трещинообразования обусловлено величиной нагрузки, а развивается вследствие ее переменного воздействия. Эти задачи можно рассматривать как проблемы малоциклового усталости. А процесс мгновенного продвижения нормальной трещины можно рассматривать как локальное изменение кривизны балки в сечении с трещиной. При исследовании напряженно-деформированного состояния динамической композитной системы удобно использовать коэффициент концентрации кривизны, характеризующий заданную глубину мгновенного проникновения трещины.

Ключевые слова: железобетонные балки, малоцикловая усталость, концентрация кривизны, разрушение.

LOW-CYCLE FATIGUE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CONSIDERING A COEFFICIENT OF THE CONCENTRATION OF CURVATURE

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department "Mechanics".

Zemtsova Olga Grigorevna,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Mechanics".

Abstract

For heavily loaded reinforced concrete beams with additional dynamic loading, there is a danger of rapid destruction. There arises the problem of calculating the structure in the conditions of progressive destruction. In problems of the dynamics of highly loaded systems, in contrast to fatigue cracking, the onset of crack formation is due to the magnitude of the load, but develops as a result of its variable effect. These problems can be considered as problems of low cycle fatigue. And the process of instantaneous propagation of a normal crack can be considered as a local change in the curvature of a beam in a section with a crack. When studying the stress-strain state of a dynamic composite system, it is convenient to use the curvature concentration coefficient characterizing a given depth of instantaneous crack penetration.

Keywords: reinforced beams, low-cycle fatigue, concentration of curvature, destruction.

Для тяжело нагруженных железобетонных балок при дополнительном динамическом нагружении возникает опасность достаточно быстрого разрушения. Появляется проблема расчета в условиях прогрессирующего динамического разрушения. Расчет на основе теории предельного равновесия чрезвычайно удобен и при динамическом расчете, но полное пренебрежение

деформациями механической системы затрудняет практическое проектное конструирование. Кроме того, в реальных конструкциях не должно образовываться ни одного пластического шарнира даже в условиях статического нагружения, а тем более при знакопеременной динамической работе системы.

В изгибаемых железобетонных элементах бетон можно рассматривать как хрупкопластический материал, в котором даже в условиях статического нагружения реализуются два внутренних переменных состояния – хрупкое разрушение в растянутой зоне и пластическое деформирование (в пределе заканчивающееся дроблением) в сжатой зоне. В связи с этим решение задачи о напряженно-деформированном состоянии железобетонных элементов необходимо выполнять в рамках единых понятий механики твердого деформируемого тела и механики разрушения.

Хрупкое разрушение бетона в растянутых зонах железобетонных элементов связано с образованием и развитием трещин. В дальнейшем будем рассматривать трещины нормального отрыва.

При принятии аппроксимирующих зависимостей [1, 2, 3] воспользуемся понятиями предельной сжимаемости $[\varepsilon^-]$ и предельной растяжимости бетона $[\varepsilon^+]$, т.е. деформациями бетона в момент разрушения непрерывной структуры. Для расчета при, так называемом, кратковременном нагружении можно принять предельную сжимаемость $[\varepsilon^-] \approx 2,0 \cdot 10^{-3}$; предельную растяжимость при осевом растяжении $[\varepsilon^+] \approx (1,5 \div 3) \cdot 10^{-4}$; при изгибе и внецентренном сжатии $[\varepsilon^-] \approx 3,5 \cdot 10^{-3}$.

Арматурные стали подразделяются на мягкие – с развитой площадкой текучести, и твердые, низколегированные стали, которые нормируются по пределу прочности. В качестве рабочей арматуры колонн и ригелей обычно используют твердые стали.

В задачах динамики высоконагруженных систем в отличие от усталостного трещинообразования, начало трещинообразования обусловлено

величиной нагрузки, а развивается вследствие ее переменного воздействия. Эти задачи можно рассматривать как проблемы малоциклового усталости.

До достижения в крайних волокнах растягивающими напряжениями (или деформациями) некоторых предельных значений, внутреннюю статическую неопределимость будем раскрывать на основе обычной гипотезы плоских сечений и условий равновесия твердого нелинейно деформируемого композита [8, 9].

После достижения в некотором сечении деформаций, равных предельным, в растянутых волокнах образуется трещина, которая может быстро развиваться. Сдерживающее влияние при этом оказывает, в основном, растянутая стальная (углеволоконная, композитная полимерная и т.п.) арматура (рисунок 1).

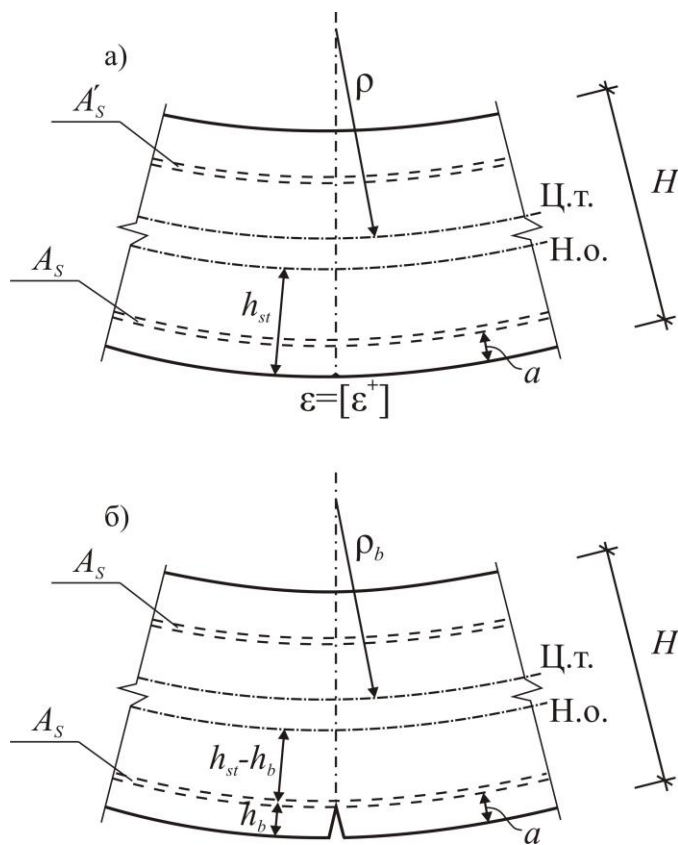


Рисунок 1

После образования трещины возникает вопрос об условиях ее движения и границах. Процесс движения трещины можно рассматривать как процесс

постепенного разделения элемента на две части [6, 7]. Если для чисто бетонного элемента появление и развитие трещины связано с переходом от движения с деформациями к движению, обусловленному поворотами двух твердых тел, то трещинообразование и повороты в железобетонном элементе сдерживаются арматурой [10]. Скачкообразное продвижение трещины возможно в границах защитного слоя, а дальнейший прирост, развитие трещины возможен только в условиях роста нагрузки [4, 5]. Процесс мгновенного продвижения трещины можно рассматривать как локальное изменение кривизны балки в сечении с трещиной. В неармированных элементах появление трещины может привести к полному разрушению изогнутого элемента. В армированных элементах глубина проникновения трещины зависит от уровня нагрузки, толщины защитного слоя, от диаметра, количества и класса арматуры. Глубину проникновения трещины в тело железобетонного элемента можно ограничить некоторой величиной h_b .

Если прогиб балки определяется функцией $w=f(x)$, то кривизну кривой гибкого элемента можно вычислить по формуле:

$$k = \frac{w''}{[1 + (w')^2]^{\frac{3}{2}}}.$$

Для железобетонных (как правило, достаточно жестких) элементов можно воспользоваться приближенным выражением для кривизны:

$$k = w''.$$

Пусть деформация растянутой зоны сечения $[\varepsilon^+]$ соответствует началу трещинообразования. Соответствующая кривизна оси изогнутой балки равна:

$$k = [\varepsilon^+] / h_{st},$$

где h_{st} – высота растянутой зоны сечения. При росте длины трещины до величины h_b кривизна достигнет значения

$$k_b = [\varepsilon^+] / (h_{stb} - h_b).$$

Введем в рассмотрение коэффициент концентрации кривизны α . Этот коэффициент характеризует заданную глубину мгновенного проникновения трещины. Он равен отношению

$$\alpha = k_b / k,$$

или

$$\alpha = h_{st} / (h_{st} - h_b).$$

При конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений динамического равновесия по геометрической координате локальное изменение кривизны в рассматриваемом сечении i приближенно можно записать в виде

$$w'' = \alpha \frac{w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}}{\Delta^2},$$

где Δ – длина шага по геометрической координате.

При решении этой же задачи методом конечных элементов со стержневыми элементами нарушение условия $\varepsilon^+ < [\varepsilon^+]$ в некотором промежуточном сечении конечного элемента i , т.е. появление трещины, приводит к целесообразности деления конечного элемента балки в этом сечении на две части. А на следующем шаге расчета необходимо учитывать изменение геометрии сечений двух образовавшихся элементов.

Локальное увеличение кривизны компенсирует изменение растянутой зоны бетонного сечения. Толщина защитного слоя балок принимается, в зависимости от условий эксплуатации, от 20 до 70 мм, т.е. составляет от 7 до 40% растянутой зоны бетона. Поэтому учет эффекта концентрации кривизны имеет существенное значение.

Коэффициент концентрации кривизны особенно важно использовать при повторных прогибах, когда при формировании напряженно-деформированного состояния сечений необходимо учитывать, что на сжатие работает все бетонное сечение, а на растяжение только та часть, которая не затронута трещиной на предыдущих колебаниях.

После этого расчета можно переходить к следующему шагу нагружения в статической задаче или к следующему шагу по временной координате в задаче

динамики, используя в описании геометрии рабочей части сечения и начальном векторе перемещений результаты указанного расчета [11, 12]. При этом в расчете участвует коэффициент концентрации кривизны, а из расчетной части сечения при положительных деформациях должны быть исключены ранее треснувшие волокна и дополнительно исключены фибровые волокна бетона, в которых деформации превысят предельно допустимые.

Коэффициент концентрации кривизны может быть определен опытным путем, например, на основе испытания железобетонных балок с трехточечной схемой нагружения путем измерения длины трещины и прогибов ряда точек в зависимости от величины нагрузки.

Вывод. Процесс мгновенного продвижения трещины в железобетонной балке можно рассматривать как локальное изменение кривизны балки в сечении с трещиной. При исследовании напряженно-деформированного состояния композитной системы и при статическом, и при динамическом нагружении удобно использовать коэффициент концентрации кривизны, характеризующий заданную глубину мгновенного проникновения трещины.

Библиографический список:

1. Шеин А.И. Метод сеточной аппроксимации элементов в задачах строительной механики нелинейных стержневых систем. Пенза: ПГУАС, 2005. 248 с.

2. Шеин А.И. Расчёт стержневых систем на основе уточнённой теории и метода сеточной аппроксимации элементов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2003. №1. С.38-39.

3. Шеин А.И. Решение многопараметрической задачи динамики стержневых систем методом сеточной аппроксимации элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2002. №2. С. 27.

4. Шеин А.И., Завьялова О.Б. Расчет монолитных железобетонных каркасов с учетом последовательности возведения, физической нелинейности и

ползучести бетона // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. №5. С. 64-69.

5. Zavyalova O.B., Shein A.I. Application of Grid Approximation Method for the Calculation of Monolithic Reinforced Concrete Frame Taking into Account Construction Sequence and Concrete Creep // International Conference on Advanced Engineering and Technology (ICAET 2014), December 19-21, 2014, Incheon, South Korea. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vols. 752-753. P. 617-623.

6. Шеин А.И. Метод ограниченных деформаций при решении проектной задачи для железобетонных конструкций // Наукоедение. 2017. №2. Том 9. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN217.pdf> (доступ свободный).

7. Shein A., Zemtsova O. Method of limited deformations for the calculation of parameters of reinforced concrete structures sections // Ponte. Apr. 2017. Volume 73. Issue 4.

8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996.

9. Бондаренко В.Н., Колчунов В.И. Расчётные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 472 с.

10. Мурашев В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона. М.: Машстройиздат, 1950. 268 с.

11. Шеин А.И., Земцова О.Г., Бучин Ю.Д. Метод ограниченных деформаций при расчете приопорных участков железобетонных балок и диафрагм жесткости [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №5. С. 2. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitel'naya-mehanika/5.2/at_download/file

12. Шеин А.И., Земцова О.Г. Расчет параметров сечений железобетонных конструкций методом ограниченных деформаций // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 3(272). С. 25-31.