

УДК 502/504 : 624.012.45

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С НОРМАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОЙ ПО ПРОГИБУ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Поступила 27.03.2017 г.

© **Уткин Владимир Сергеевич, Карпушова Кристина Алексеевна**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия

CALCULATION OF RELIABILITY OF THE REINFORCED CONCRETE BEAM WITH THE NORMAL CRACK ON THE DEFLECTION AT THE OPERATION STAGE

Received on March 27, 2017

© **Utkin Vladimir Sergeevich, Karpushova Christina Alekseevna**
Federal state-funded educational institution of the higher education «Vologda state university», Vologda, Russia

Прогиб железобетонной балки на стадии эксплуатации резко возрастает при образовании нормальной трещины в растянутой зоне бетона и может привести к нарушению нормальной ее эксплуатации, а в некоторых случаях предупреждает о возможной аварии. В статье рассматривается способ измерения и мониторинга прогиба балки, методика расчета надежности балки по критерию прогиба при ограниченной статистической информации о значениях прогиба в момент времени t , определение остаточного временного ресурса балки по критерию прогиба при известном предельном (нормативном) значении прогиба балки.

Ключевые слова: железобетонная балка, нормальная трещина, прогиб балки, измерение прогиба, мониторинг прогиба, надежность балки, ограниченная информация, остаточный ресурс.

Введение. Железобетонная балка по Межгосударственному стандарту ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения» на стадии эксплуатации проверяется по первой и второй группам предельных состояний. Надежность железобетонной балки (как условной последовательной механической системы) в понятиях теории надежности определяется по теореме перемножения вероятностей безотказной работы по формуле

The deflection of a steel concrete beam at an operation stage sharply increases in case of formation of a normal crack in the stretched zone of concrete and can lead to violation of its normal operation, and in certain cases warns about possible accident. In article the method of measurement and monitoring of a deflection of a beam, a method of calculation of reliability of a beam by criterion of a deflection is considered in case of limited statistical information on values of a deflection in timepoint of t , determination of a residual temporary resource of a beam by criterion of a deflection in case of the known extreme (standard) value of a deflection of a beam.

Keywords: reinforced concrete beam, normal crack, beam deflection, measurement of a deflection, monitoring of a deflection, reliability of a beam, limited information, residual resource.

$$P = \prod_{i=1}^n P_i,$$

где P_i – вероятность безотказной работы по i -тому критерию ее работоспособности.

В качестве таких критериев по СП 52.101.2003 «Бетонные и железобетонные конструкции» различают прочность арматуры и бетона, деформации (прогиб и углов поворота), ширины раскрытия трещины. Методы расчетов надежности по ряду критериев работос-

пособности железобетонной балки с трещиной был рассмотрен в работах [1, 2, 3, 4].

В предлагаемой статье рассматривается проблема измерения его мониторинга, прогиба и проблема расчета надежности железобетонной балки с нормальной трещиной по критерию прогиба балки на стадии эксплуатации и определение остаточного временного ресурса по критерию прогиба балки с трещиной.

Актуальность темы. Актуальность расчета балки на прогиб в последние годы возросла в связи с увеличением пролетов балок, применением новых высокопрочных бетонов и арматуры, в частности проволоочной арматуры, переходом к тонкостенным балкам и балкам с предварительно-напряженной арматурой и т. д., и соответственно возросла актуальность к расчетам надежности железобетонных балок по критерию прогиба. Ограничение прогибов балок вызывается технологическими процессами, а также архитектурными требованиями к конструкциям [5].

Образование трещины в железобетонной балке приводит к интенсивному развитию деформаций в арматуре в сечении балки с трещиной и заметному возрастанию ее прогиба, значение которого ограничено нормативными документами. «Определение точных значений прогиба железобетонной балки с трещиной в растянутой зоне бетона представляет сложную задачу» [5]. Предлагается новый подход к измерениям и мониторингу прогиба балок и к расчету надежности железобетонной балки по критерию ее прогиба.

Материалы и методы исследования. Для определения надежности железобетонной балки по всем критериям работоспособности используется произведение вероятностей, куда входит и вероятность реализации события

$$\tilde{f} \leq f_{пр},$$

где \tilde{f} – измеряемый прогиб балки (случайная величина); $f_{пр}$ – предельное значение прогиба (детерминированная величина, устанавливаемая нормами).

При этом следует иметь в виду, что \tilde{f} с течением времени возрастает из-за деградации материалов балки, влияния окружающей среды, увеличения ширины и длины нормальной трещины и нередко является предвестником обрушения балок.

В связи с этим необходимо периодически определять оперативную надежность балки с различными видами и состояниями опорных закреплений, т. е. с различными видами изменяющихся расчетных схем, с различной нагрузкой, различной шириной раскрытия и длины трещины. Важную роль играет мониторинг прогиба балки с трещиной, автоматизация контроля этого процесса, оценка оперативной надежности и остаточного временного ресурса железобетонной балки по значению прогиба, на что и направлено содержание статьи.

На стадии эксплуатации наиболее объективным является измерение прогиба балки существующими средствами измерений, например, с помощью высокоточных геодезических средств измерения. Для этого на балке по нижней или верхней грани намечаются точки, в которых измеряются прогибы балки (не менее чем в 3...4 сечениях балки за пределами трещины). По измеренным координатам сечений оси балки и существующего прогиба f_i подбирается по методу наименьших квадратов по компьютерной программе уравнение кривой $y = f(x)$ – оси изогнутого бруса с выходом на нулевые точки на опорах балки, а в консольных балках на одну опору, как условно показано на рисунке 1.

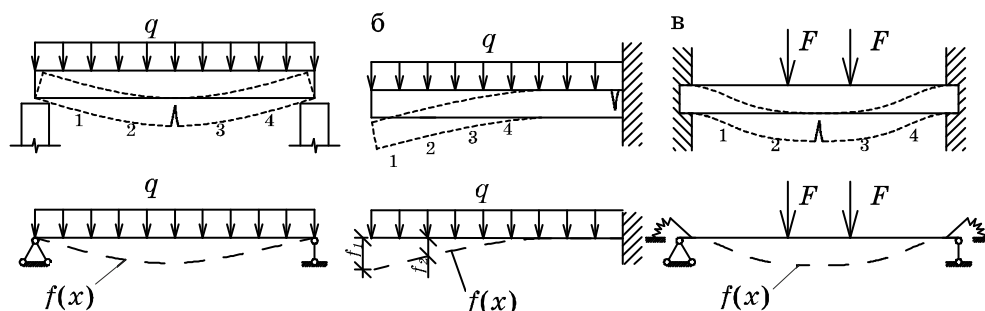


Рис. 1. Прогибы балок $y = f(x)$ с трещиной и расчетные схемы балок

По кривым $y = f(x)$ методами математического анализа находят y_{\max} , и в этом месте (а также на расстоянии 5...8 см от него) намечаются сечения балки (за пределами трещины), на нижней или верхней поверхности которой [6] наклеивают вдоль балки по три тензорезистора с базой 5 см в намеченных сечениях балки (в середине и по краям ширины балки) в трех сечениях. Это вызвано тем, что в процессе эксплуатации балки нагрузка может меняться, по значению и положению, может изменяться место y_{\max} и даже значение прогиба по ширине балки. В связи с этим, а также для статистики измеряются прогибы f и деформации ε_b бетона на ширине балки с помощью тензорезисторов. По результатам измерения омического сопротивления R тензорезисторов строятся графики зависимости R каждого тензорезистора от прогиба балки в трех сечениях вблизи с трещиной, где обычно прогиб наибольший. Для этого предварительно балка нагружается испытательной нагрузкой F (на разгрузке), например, гидравлическим домкратом, установленным снизу балки, для частичной разгрузки балки. Начальное сопротивление тензорезистора R_0 , которое условно принято равным нулю. За три ступени разгрузки балки до $F = 0$ измеряются значения сопротивлений тензорезисторов R_i и прогиба f_i балки высокоточным нивелиром и рейкой при каждом значении R_i . По полученным значениям $R = |R_i - R_0|$ и f_i с учетом масштаба строят графики зависимости значений прогибов от соответствующих омических сопротивлений тензорезисторов $f(R)$ для каждого тензорезистора и выбирают наиболее крутой. Условно на рисунке 2. показан график зависимости прогиба балки f от значения сопротивления R тензорезистора. По графикам или функции $f(R)$ (в дальнейшем только по значениям сопротивления тензорезисторов R_i на стадии мониторинга) определяют значения прогибов балки f_i в любой момент времени, а также по значению предельного (нормативного) прогиба балки определяют значение R_{\max} , как показано на рисунке 2. Таким образом

текущий контроль за прогибами f_i заменяется на контроль за изменением сопротивлений R_i тензорезисторов.

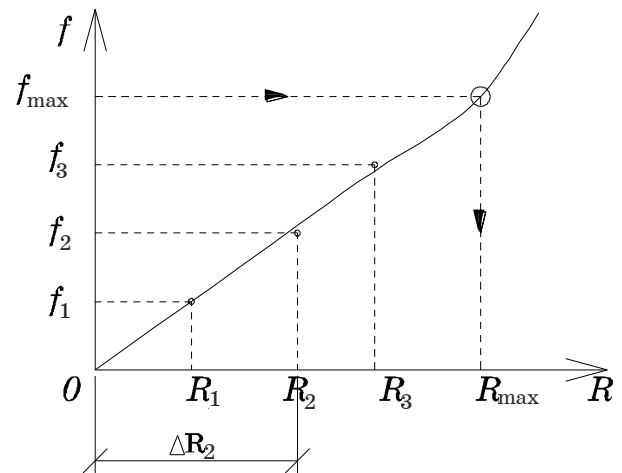


Рис. 2. График зависимости (условный) f_i от R_i (при $R_0 = 0$) и нормативное значение прогиба балки $f_{\max} = f_{\text{норм}}$

При длительных испытаниях (мониторинге) и использовании тензорезисторов их закрывают полиэтиленовой пленкой и изолируют эпоксидной смолой для защиты от внешних воздействий. Через некоторое время мониторинга определяют значения сопротивлений R_i тензорезисторов и по графику или функции $f(R)$ выявляют значения $f(t)$ во всех сечениях балки в некоторый момент времени t с наибольшим прогибом. По трем тензорезисторам в этом сечении балки ($n = 3$) получим некоторое множество значений сопротивлений R_j или прогибов $\{f_1, f_2, f_3\}$ в момент времени t , по которым математически описывается прогиб балки, как нечеткую переменную, методом теории возможностей [7] в виде функции распределения возможностей $\pi_X(x)$ [1, 2, 3, 4]. Наибольшее использование в теории и на практике получила функция распределения возможностей [8] вида

$$\pi_X(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right],$$

изображенная на рисунке 3, где $a_x = 0,5(R_{\max} + R_{\min})$, $b_x = 0,5(R_{\max} - R_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$ или $a_x = 0,5(f_{\max,t} + f_{\min,t})$, $b_x =$

$0,5(f_{\max,t} - f_{\min,t})/\sqrt{-\ln \alpha}$ $\alpha \in [0;1]$. Значением уровня среза α (см. рисунок 3) согласно [9] задаются параметры $\pi_X(x)$, описанные в [1, 2, 3, 4]. $\pi_X(x)$ показывает значение возможности события $X = x$.

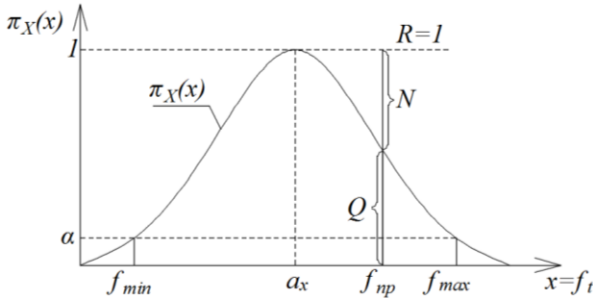


Рис. 3. Функция распределения возможностей $\pi_X(x)$ для нечеткой переменной $X = \tilde{f}$

При «среднем» прогибе $a_x = 0,5(f_{\max} + f_{\min}) < f_{np}$ возможность R нормального функционирования балки по критерию прогиба $R = 1$. Возможность отказа балки определяется по формуле

$$Q = \exp \left[- \left(\frac{f_{np} - a_x}{b_x} \right)^2 \right],$$

где f_{np} – предельный прогиб балки по нормам.

Необходимость безотказной работы балки $N = 1 - Q$. Надежность балки по критерию f (по прогибу) характеризуется интервалом $[N; R]$ или $[\underline{P}; \bar{P}]$, где $\underline{P}; \bar{P}$ – нижнее и верхнее значения вероятности безотказной работы балки по критерию прогиба.

Пример. Пусть (условно) известны в момент времени t значения $f_t = \{10, 12, 14\}$ мм, $f_{np} = 14$ мм. При $\alpha = 0,1$ имеем $a_x = 12$ мм, $b_x = 1,32$ мм. Так как $a_x = 12$ мм $< f_{np} = 14$ мм, то возможность безотказной работы балки по критерию прогиба $R = 1$. Следовательно

$$Q = \exp \left[- \left(\frac{14 - 12}{1,32} \right)^2 \right] = 0,1007.$$

Отсюда $N = 1 - 0,1007 = 0,8993$. Надежность балки по критерию прогиба характеризуется интервалом $[0,8993; 1]$ или в вероятностных показателях $[\underline{P} = 0,8993; \bar{P} = 1]$. Истинная вероят-

ность безотказной работы неизвестна, а возможное нижнее значение $\underline{P} = 0,8993$.

По измеренным значениям R_i в момент времени t_i и соответствующим значениям f_i , как показано на рисунке 2, по точкам $(f_i; t_i)$ строится график прогибов $f(t)$ во времени t , изображенный на рисунке 4. По значению предельного прогиба f_{np} , установленному нормами, проводится прямая, параллельная оси времени t до пересечения с графиком $f(t)$. Точка пересечения будет соответствовать предельному времени t_{np} , при котором измерения прогибов балки достигнет предельного значения f_{np} . Разность $f_{np} - f_n$ и будет остаточному временному ресурсу балки по критерию прогиба.

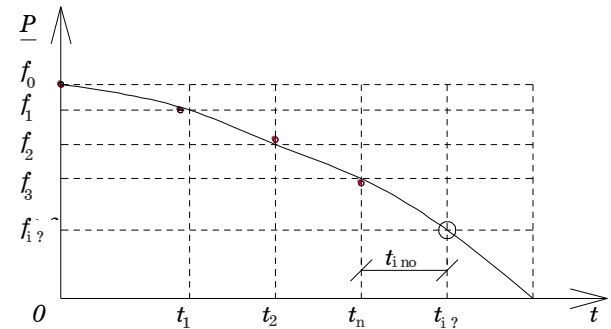


Рис. 4. Диаграмма зависимости прогиба балки \underline{P} балки от времени ее эксплуатации t

Выводы

Рассмотрен способ измерения прогибов железобетонной балки через измерения омического сопротивления тензорезисторов, наклеенных на балке.

Предложен метод расчета надежности железобетонной балки по малому числу измерений прогиба балки с трещиной в одном сечении с наибольшими значениями прогибов (с наибольшими значениями сопротивлений тензорезисторов).

Показан способ определения остаточного временного ресурса балки с трещиной по критерию предельно-допустимого прогиба.

Библиографический список

1. Уткин В.С., Карпушова К.А. Расчет надежности железобетонной балки по критерию прочности рабочей арматуры

при образовании нормальной трещины в растянутой зоне бетона // Экология и строительство. – 2016. – № 2. – С. 4–8.

2. Уткин В.С., Карпушова К.А. Расчет надежности железобетонных балок по критерию прочности бетона в сечении с нормальной трещиной // Экология и строительство. – 2016. – № 4. – С. 4–8.

3. Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности железобетонной балки на стадии эксплуатации по критерию длины трещины в бетоне // Вестник МГСУ. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – 2016. – № 1. – С. 57–68.

4. Уткин В.С., Соловьев С.А. Определение несущей способности железобетонных балок на стадии эксплуатации при наличии трещины в бетоне // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – 2015. – № 6. – С. 56–65.

5. Попов Н.Н., Забегаев А.В. Проектирование и расчет железобетонных и каменных конструкций: Учеб. для строит. спец. Вузov. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 400 с.

6. Лужин О.В., Злочевский А.Б., Горбунов И.А., Волохов В.А. Обследование и испытание сооружений: Учебное пособие. – М.: Стройиздат, 1987. – 269 с.

7. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

8. Уткин В.С., Уткин Л.В. Расчет надежности механических систем при ограниченной статистической информации: монография / Вологда: ВоГТУ, 2008. – 188 с.

9. Уткин В.С., Соловьев С.А., Каберова А.А. Значение уровня среза (риска) при расчете надежности несущих элементов возможным методом // Строительная механика и расчет сооружений. – 2015. – № 5. – С. 63–67.

Сведения об авторах

Уткин Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; 160000, г. Вологда, ул. Ленина 15; e-mail: utkinvogtu@mail.ru.

Карпушова Кристина Алексеевна, магистрант; Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; 160000, г. Вологда, ул. Ленина 15; e-mail: karpuschowa.kris@yandex.ru.

References

1. Utkin V.S., Karpushova K.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnoj balki po kriteriju prochnosti rabochej armatury pri obrazovanii normal'noj treshhiny v rastjanutoj zone betona // Jekologija i stroitel'stvo. – 2016. – № 2. – S. 4–8.

2. Utkin V.S., Karpushova K.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnyh balok po kriteriju prochnosti betona v sechenii s normal'noj treshhinoj // Jekologija i stroitel'stvo. – 2016. – № 4. – S. 4–8.

3. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnoj balki na stadii jekspluatacii po kriteriju dliny treshhiny v betone // Vestnik MGSU. Nauchno-tehnicheskij zhurnal po stroitel'stvu i arhitekture. – 2016. – № 1. – S. 57–68.

4. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Opredelenie nesushhej sposobnosti zhelezobetonnyh balok na stadii jekspluatacii pri nalichii treshhiny v betone // Vestnik grazhdanskih inzhenerov, SPbGASU. – 2015. – № 6. – S. 56–65.

5. Popov N.N., Zabegaev A.V. Proektirovanie i raschet zhelezobetonnyh i kamennyh konstrukcij: Ucheb. dlja stroit. spec. Vuzov. – 2-е изд., pererab. i dop. – М.: Vyssh. shk., 1989. – 400 s.

6. Luzhin O.V., Zlochevskij A.B., Gorbunov I.A., Volohov V.A. Obsledovanie i ispytanie sooruzhenij: Uchebnoe posobie. – М.: Strojizdat, 1987. – 269 s.

7. Djubua D., Prad A. Teorija vozmozhnostej. Prilozhenija k predstavleniju znaniy v informatike / Per. s fr. – М.: Radio i svjaz', 1990. – 288 s.

8. Utkin V.S., Utkin L.V. Raschet nadezhnosti mehanicheskikh sistem pri ogranichennoj statisticheskoj informacii: monografija / Vologda: VoGTU, 2008. – 188 s.

9. Utkin V.S., Solov'ev S.A., Kaberova A.A. Znachenie urovnja sreza (risk) pri raschete nadezhnosti nesushhih jelementov vozmozhnostnym metodom // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2015. – № 5. – S. 63–67.

Information about the authors

Utkin Vladimir Sergeyevich, doctor of technical sciences, professor; Federal state-funded educational institution of the higher education «Vologda state university»; 15 Lenin St., Vologda, 160000; e-mail: utkinvogtu@mail.ru.

Karpushova Christina Alekseevna, undergraduate student; Federal state-funded educational institution of the higher education «Vologda state university»; 15 Lenin St., Vologda, 160000; e-mail: karpuschowa.kris@yandex.ru.

Для цитирования: Уткин В. С., Карпушова К. А. Расчет надежности железобетонной балки с нормальной трещиной по прогибу на стадии эксплуатации // Экология и строительство. – 2017. – № 1. – С. 4–9.

For citations: Utkin V. S., Karpushova K. A. Calculation of reliability of the reinforced concrete beam with the normal crack on the deflection at the operation stage // Ekologiya & Stroitelstvo. – 2017. – № 1. – P. 4–9.