



С.А. Соловьев, Л.С. Шевцов
Вологодский государственный университет

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ТРЕЩИНЫ НА ОСНОВЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

В данной работе предлагается подход к оценке несущей способности (в виде предельного изгибающего момента) изгибаемых железобетонных элементов по параметрам трещины – длины и ширины раскрытия. Приведена функциональная зависимость между расчетным сопротивлением бетона при сжатии и критическим коэффициентом интенсивности напряжений бетона.

Механика разрушения, ширина раскрытия трещины, длина трещины, несущая способность, предельная нагрузка, железобетон, изгибаемый элемент.

Изгибаемые железобетонные элементы входят в состав многих зданий и сооружений в виде балок и плит покрытия/перекрытия, ростверков, перемычек и других несущих элементов конструкций. При отсутствии предварительного напряжения арматуры, эффективное использование несущей способности таких элементов обусловлено наличием в них нормальных и наклонных трещин. Наличие такого рода повреждений изменяет напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов, снижает их жесткость, скачкообразно увеличивает напряжения в арматуре. Одним из перспективных направлений для описания работы и поведения с трещинами является использование положений механики разрушений при расчете и проектировании.

В работе [1] К.А. Пирадовым и Н.В. Савицким отмечено, что на данный момент теоретически обоснованного расчета железобетонных элементов при наличии в них трещин не разработано, а существующий расчет по предельным состояниям, введенный в 1955 г., построен на целом ряде эмпирических коэффициентов, в связи с чем предлагается переходить к расчету железобетонных конструкций методами механики разрушения. В [2] В.И. Колчунов отмечает, что при решении проблем моделирования работы железобетонных конструкций с трещинами возникает дилемма – либо заново разработать механику железобетона, на что уйдет не одно десятилетие, либо опираться на существующие положения механики разрушения, которая развивается уже целое столетие и занимается изучением напряженно-деформированного состояния в окрестности трещин.

Зарубежные исследователи также уделяют большое внимание применению механики разрушения железобетона. В работе [3] исследуются вопросы усиления железобетонных изгибаемых элементов с трещинами и аналитическое описание данного усиления на базе положений механики разрушения. Исследование возникновения и траектории развития нормальной трещины в железобетонном элементе приведено в работе [4]. Изучению допустимой длины нормальной

трещины в зависимости от места ее расположения посвящена работа [5].

В данной статье предлагается рассмотреть подход к определению предельной нагрузки на железобетонный элемент при изгибе по заданным предельным параметрам трещины – длине и ширине, на базе расчетных зависимостей механики разрушения.

Ширина раскрытия трещины в бетонном образце при изгибе на основе положений механики разрушения [6] может быть представлена в виде:

$$a_{b,cr} = \frac{M^2 Y^2 (l_0)(1-\nu)(l_{cr} - a)\sqrt{l_{bg}}}{b^2 h^3 E_b l_{cr} K_{IC}^b \pi^{3/2}}, \quad (1)$$

где

$$Y(l_0) = \sqrt{0,4 \cdot l_0 (1,99 - 2,47 \cdot l_0 + 12,97 \cdot l_0^2 - 23,17 \cdot l_0^3 + 24,80 \cdot l_0^4)}$$

– Y – тарировка [6]; $l_0 = l_{cr} / h$; M – изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением; l_{cr} – длина трещины; h – высота сечения элемента; ν – коэффициент Пуассона; $l_{bg} = 1$ м по [6]; b – ширина сечения элемента; E_b – модуль упругости бетона; K_{IC}^b – критический коэффициент интенсивности напряжений бетона.

Арматурные стержни сдерживают рост трещины, вызывая ее закрытие на величину:

$$a_{s,cr} = \frac{8K_{IC}^{st}}{\pi b E_b K_{cr} \sqrt{\pi d}} \Gamma(l_{cr}, a), \quad (2)$$

где K_{IC}^{st} – критический коэффициент интенсивности напряжений стали арматуры; d – диаметр арматуры; a – расстояние от центра тяжести сечения арматуры до нижней грани бетона изгибаемого элемента; K_{cr} – коэффициент, принимаемый $K_{cr} = \pi$ при отсутствии трещины в арматуре и $K_{cr} = 1$, при наличии трещины длиной менее половины диаметра

стержня арматуры; $\Gamma(l_{cr,c}, a)$ – гамма-функция Эйлера.

Ширина раскрытия трещины на уровне растянутой арматуры вычисляется как разница выражений (1) и (2) [6]:

$$a_{cr,c} = \frac{M^2 Y^2(l_0)(1-\nu)(l_{cr,c} - a)\sqrt{l_{bg}}}{b^2 h^3 E_b l_{cr,c} K_{IC}^b \pi^{3/2}} - \frac{8K_{IC}^{st}}{\pi b E_b K_{cr,c} \sqrt{\pi d}} \Gamma(l_{cr,c}, a). \quad (3)$$

Отсюда можно выразить изгибающий момент в виде:

$$M = \sqrt{\frac{K_{IC}^b b h^3 l_{cr,c} (8K_{IC}^{st} \cdot \Gamma(l_{cr,c}, a) + \pi^{3/2} E_b a_{cr,c} b \sqrt{d})}{Y^2(l_0) \sqrt{d} (a - l_{cr,c})(\nu - 1)}}. \quad (4)$$

Предельная ширина раскрытия трещины ограничивается значениями, приведенными в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» и СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии». Рекомендации по ограничению ширины раскрытия трещины на основе других нормативных документов можно найти в работе [7].

Предельная длина зачастую ограничивается значениями в зависимости от доли высоты сечения элемента, как было отмечено выше. В этом случае коэффициент принимает фиксированные значения, приведенные в таблице.

Таблица

Значения Y -тарировки в зависимости от предельной длины трещины $l_{cr,c,ult}$

$l_{cr,c,ult}$	0,3h	0,5h	0,65h	0,75h
$Y(l_0)$	0,690	1,186	2,003	3,015
$Y^2(l_0)$	0,476	1,406	4,012	9,092

В [7] также приведены соотношения между классами бетона и критическими коэффициентами интенсивности напряжений в бетоне. На основе этой информации, используя СП 63.13330.2018, можно получить зависимость (рис. 1) между расчетным сопротивлением бетона R_b и критическим коэффициентом интенсивности напряжений бетона K_{IC}^b .

Используя регрессионный анализ, можно определить линейную функцию в виде (значения R_b в МПа): $K_{IC}^b(R_b) = 0,084 + 0,016 \cdot R_b$.

Если принять $l_{cr,c,ult} = 0,65h$ в соответствии с [5], то выражение (4) примет вид:

$$M_{ult} = \sqrt{\frac{0,65bh^4(0,084 + 0,016 \cdot R_b)(8K_{IC}^{st} \cdot \Gamma(l_{cr,c}, a) + \pi^{3/2} E_b a_{cr,c,ult} b \sqrt{d})}{4,012 \sqrt{d} (a - 0,65h)(\nu - 1)}}. \quad (5)$$

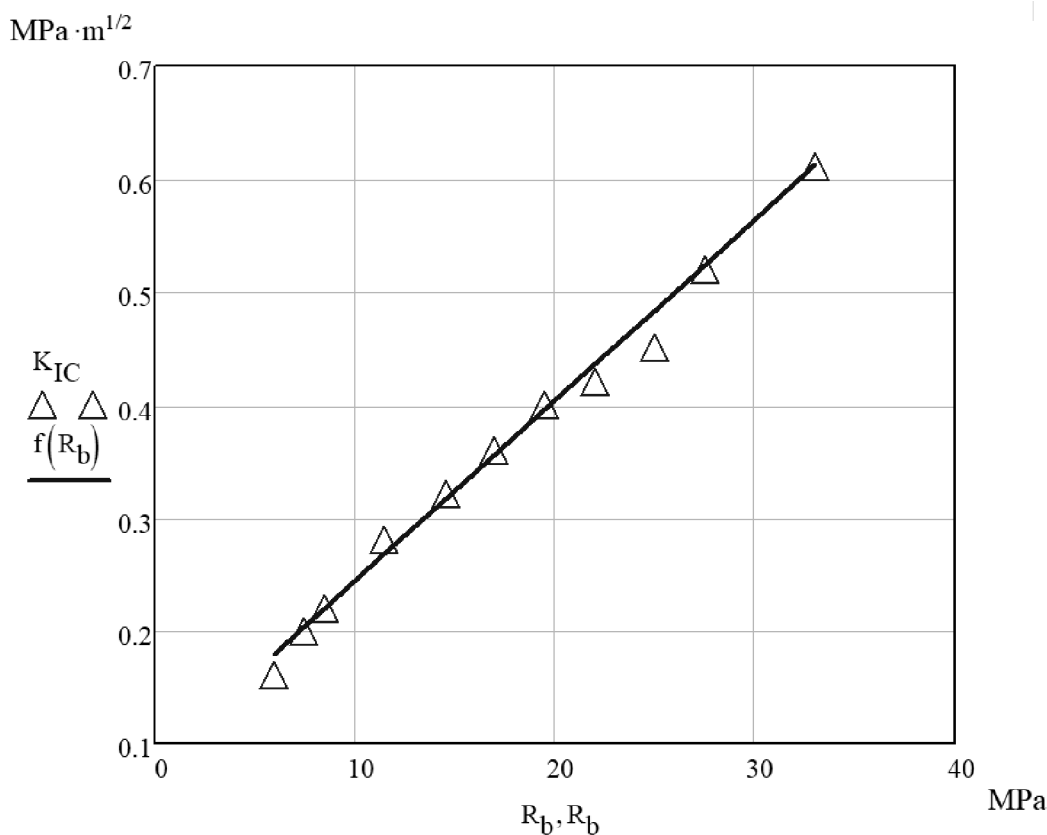


Рис. 1. График зависимости между критическим коэффициентом интенсивности напряжений бетона и расчетным сопротивлением бетона

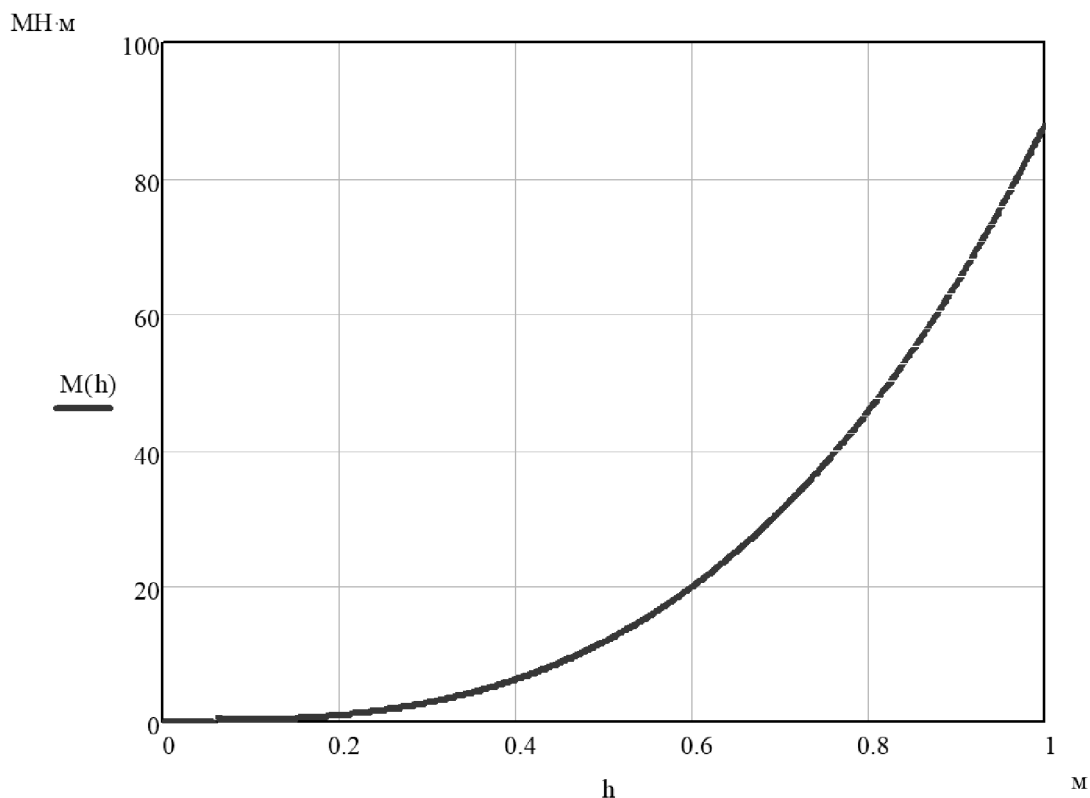


Рис. 2. График зависимости предельного момента изгибаемого элемента от высоты сечения h

Рассмотрим оценку несущей способности на конкретном примере. Пусть имеется железобетонная балка с размерами поперечного сечения $h=400$, $b=250$ мм; $a=40$ мм. Бетон класса В25 с параметрами (в соответствии с СП 63.13330.2018): $R_b=14,5$ МПа; $E_b=30000$ МПа; $\nu=0,2$. Арматура: 5 стержней $d=12$ мм, класса А400 ($K_{IC}^{st} = 25$ МПа·м^{1/2}). $a_{cr,ult} = 0,3$ мм. Гамма функция Эйлера составит: $\Gamma(l_{cr}, a) = 1,826$. Тогда предельный изгибающий момент по (5) будет $M_{ult} = 6,23$ МН·м.

На рисунке 2 представлен график зависимости несущей способности изгибаемого элемента от высоты сечения h .

Согласно расчету по прочности нормального сечения по СП 63.13330.2018, несущая способность нормального сечения составит:

$$M_{ult} = R_s A_s \frac{R_s A_s}{R_b b} \left(h_0 - 0,5 \frac{R_s A_s}{R_b b} \right) \rightarrow 0,083 \text{ МН·м,}$$

где $A_s = 5,65 \cdot 10^{-4}$ м² – площадь поперечного сечения арматуры; $R_s = 400$ МПа – расчетное сопротивление стали арматуры. Результаты по формуле (5) оказались завышенными, что может свидетельствовать о неоптимальности параметров ограничения размеров трещины, а также локальности применения функциональных зависимостей (1)–(5).

Выводы:

1. Рассмотрена проблема дальнейшего развития теории расчета железобетонных конструкций с ис-

пользованием положений теории механики разрушения.

2. Предложена функциональная зависимость расчетного сопротивления бетона при сжатии и критического коэффициента интенсивности напряжений в бетоне.

3. Необходимо дальнейшее исследование вопросов о допустимой длине и ширине раскрытия трещины в изгибаемых железобетонных элементах на основе положений механики разрушения.

Литература

1. Пирадов, К. А. Механика разрушения и теория железобетона / К. А. Пирадов, Н. В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 23–25.
2. Kolchunov, V. I. The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete / V. I. Kolchunov, A. I. Dem'yanov // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – No. 88 (4). – P. 60–69.
3. Yehia, N. A. B. Fracture mechanics approach for flexural strengthening of reinforced concrete beams / N. A. B. Yehia // Engineering Structures. – 2009. – Vol. 31. – Issue 2. – P. 404–416.
4. Zhang, J. Simulation of crack propagation in fiber-reinforced concrete by fracture mechanics / J. Zhang, V. C. Li // Cement and Concrete Research. – 2004. – Vol. 34. – Issue 2. – P. 333–339.
5. Carpinteri, A. Propagation of flexural and shear cracks through RC beams by the bridged crack model / A. Carpinteri, J. R. Carmona, G. Ventura // Magazine of concrete research. – 2007. – No. 10. – P. 743–756.

6. Пирадов, К. А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона / К. А. Пирадов. – Тбилиси : Энергия, 1998. – 355 с.

7. Соловьев, С. А. Анализ надежности железобетонной балки по ширине раскрытия трещин на основе ACI 224R-01 / С. А. Соловьев, Л. С. Шевцов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 2 (4). – С. 75–77.

S.A. Solovyev, L.S. Shevtsov

**LOAD-BEARING CAPACITY EVALUATION OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS
BY CRACK PARAMETERS BASING ON FRACTURE MECHANICS**

In this paper, we propose an approach to assessing the bearing capacity (in the form of ultimate bending moment) of bent reinforced concrete elements by the crack parameters - the length and width of the opening. The functional relationship between the calculated concrete resistance during compression and the critical coefficient of stress intensity of concrete is given.

Fracture mechanics, crack width, crack length, load-bearing capacity, ultimate load, reinforced concrete, flexural element.