

УДК 624.012.4-183.2, 624.044:539.384

**Радайкин О.В.** – ассистент

E-mail: olegxxii@mail.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **К совершенствованию методики расчёта жёсткости изгибаемых железобетонных элементов из обычного железобетона**

#### **Аннотация**

Целью исследований являлось усовершенствование физической модели деформирования изгибаемого железобетонного элемента с трещинами на основе современных достижений теории накопления повреждений и механики разрушения. Представленная модель позволяет определять жёсткость элемента в стадии эксплуатации с учётом повреждений, работы растянутого бетона над макротрещиной, концентрации напряжений в её вершине, а также наличия зоны предразрушения в ней. Выполнен анализ результатов расчёта жёсткости элементов с различным процентом армирования по предложенной методике и диаграммному методу с применением разных диаграмм деформирования бетона. Установлено, что наибольшее влияние работа растянутого бетона над макротрещиной на жёсткость оказывает при нагрузке, превышающей момент трещинообразования не более, чем на 30 %, что особенно выражено в сильноармированных элементах (до 48 %).

**Ключевые слова:** изгибаемый элемент, железобетон, жёсткость, диаграмма деформирования, диаграммный метод, методика расчета, механика разрушения железобетона, трещины, повреждаемость.

Как правило, при проектировании изгибаемых конструкций из обычного железобетона (без предварительного напряжения арматуры) для обеспечения безопасности и надёжности их работы определяющими оказываются расчётные требования второй группы предельных состояний, в частности требования по ограничению прогибов предельными величинами. Для вычисления прогибов рассматриваемых конструкций необходимо определить их жёсткость, на которую, в свою очередь, существенно влияет наличие трещин в растянутом бетоне. При этом следует отметить, что в стадии эксплуатации наличие трещин в изгибаемой конструкции допускается, ограничивается лишь ширина их раскрытия.

Численное значение жёсткости железобетонного сечения, как известно, входит в расчёт не только прогибов, но и используется при определении изгибающих моментов в статически неопределимых конструкциях с учётом перераспределения усилий. В обоих случаях учет трещин позволяет отразить действительную работу конструкции и тем самым обеспечить её рациональное конструирование и эффективный расход материала.

В связи с этим исследования, направленные на разработку и совершенствование методики расчёта жёсткости железобетонных изгибаемых элементов с трещинами в стадии эксплуатации, являются актуальными.

Нормативный расчёт методом предельных состояний (МПС) рассматривает трещинообразование, как достижение предельного значения той или иной величины, выбираемой в качестве критерия прочности [1]. Причём физические процессы, протекающие в эксплуатационной стадии и предшествующие окончательному разрушению элемента, в рассмотрение здесь либо не входят вообще, либо учитываются косвенно через эмпирические коэффициенты. В частности, пренебрегается работой растянутого бетона над макротрещиной, не учитывается концентрация напряжений в её вершине, а также влияние рассеянных мелких трещин на поведение железобетона под нагрузкой. Неучет этих факторов может привести к заметному занижению жёсткости

поперечных сечений и, как следствие, к перерасходу стали и бетона при проектировании изгибаемых конструкций и элементов.

В развитие МПС ещё в 1960-е гг. Я.М. Немировским впервые были рассмотрены вопросы расчёта деформаций изгибаемых ЖБК с учётом работы растянутого бетона над макротрещиной [2]. Для этого в систему разрешающих уравнений, описывающих модель железобетонного сечения, им было введено дополнительное линейное соотношение, связывающее высоту макротрещины  $l$  с изгибающим моментом  $M$ , что было сделано на основе малого числа экспериментальных данных. Последнее обстоятельство и сама по себе сложность такого подхода, как отмечено в работе А.С. Залесова и В.В. Фигаровского [3], не позволили на тот момент найти ему широкое практическое применение. Кроме того, более поздние опыты К.А. Пирадова [4] показали нелинейную зависимость между  $l$  и  $M$ .

Устранить указанные несоответствия МПС реальной работе конструкции в определённой мере способен диаграммный метод расчёта ЖБК [1, 5]. Положительной чертой данного метода является то, что он позволяет производить расчёты изгибаемых ЖБК по I-й и II-й в группам предельных состояний на основе единого подхода. Хотя диаграммный метод в последние годы и стал интенсивно внедряться в нормативную базу проектирования ЖБК, однако его широкое распространение на практике сдерживается тем, что всё ещё дискуссионным остаётся вопрос, какой зависимостью аппроксимировать экспериментальные кривые деформирования бетона и стальной арматуры. Кроме того, есть и другая нерешённая проблема: как учитывать концентрацию напряжений в вершине макротрещины в рамках данного метода?

В связи с этим, как в нашей стране, так и за рубежом, проводятся исследования и разрабатываются методы относительно новой молодой науки – механики разрушения [6]. В целом, использование её методов позволяет дополнить МПС и диаграммный метод новыми практическими результатами при оценке жёсткости сечений. Однако они также не способны учесть снижение сопротивляемости бетона за счёт накопления в нём рассеянных мелких трещин. Уточнить получаемые результаты в этом вопросе способна теория накопления повреждений [7]. В ней предполагается существование непрерывной изотропной среды, в которой распределены отдельные дефекты структуры – рассеянные мелкие трещины, подчиняющиеся статистическим законам и определяющие действительную прочность и деформативность материала конструкции.

Таким образом, в работе приняты отдельно две расчётные схемы поперечного сечения элемента:

- **до образования макротрещины** в нормальном сечении элемента его растянутая зона представлена моделью в виде пучка связанных волокон Х. Даниэлса [8] (рис. 1, а). Они имеют различную прочность на растяжение  $R_i$ , что обусловлено развитием в материале начальных усадочных мезотрещин разной длины. При этом неравномерное распределение прочности растянутого бетона по сечению пучка описывается нормальным законом. Бетон сжатой зоны считаем линейно-упругим неповреждаемым материалом. Условие сплошности на этой стадии, согласно предпосылкам теории накопления повреждений, обеспечивается введением в расчётные формулы параметра повреждаемости Качанова-Работнова;

- **после образования макротрещины** рассматривается равновесие железобетонного сечения с введенным в него математическим острым разрезом Ирвина-Орвана, моделирующим макротрещину (рис. 1, б). Таким образом учитывается работа растянутого бетона над макротрещиной и концентрация напряжений в её вершине. Дополнительно к этому учитывается микрорастрескивание в вершине разреза, используя для этого модифицированную автором модель фиктивной трещины С.П. Ша [6]. Это, в свою очередь, предполагает: 1) удлинение разреза Ирвина-Орвана (фактической макротрещины) на величину, равную размеру зоны предразрушения  $d_f$ , и 2) приложение к образовавшимся новым поверхностям трещины сил сцепления  $p$ , распределённых по треугольному закону; а размер  $d_f$  принят константой материала, которая определяется из опытов.

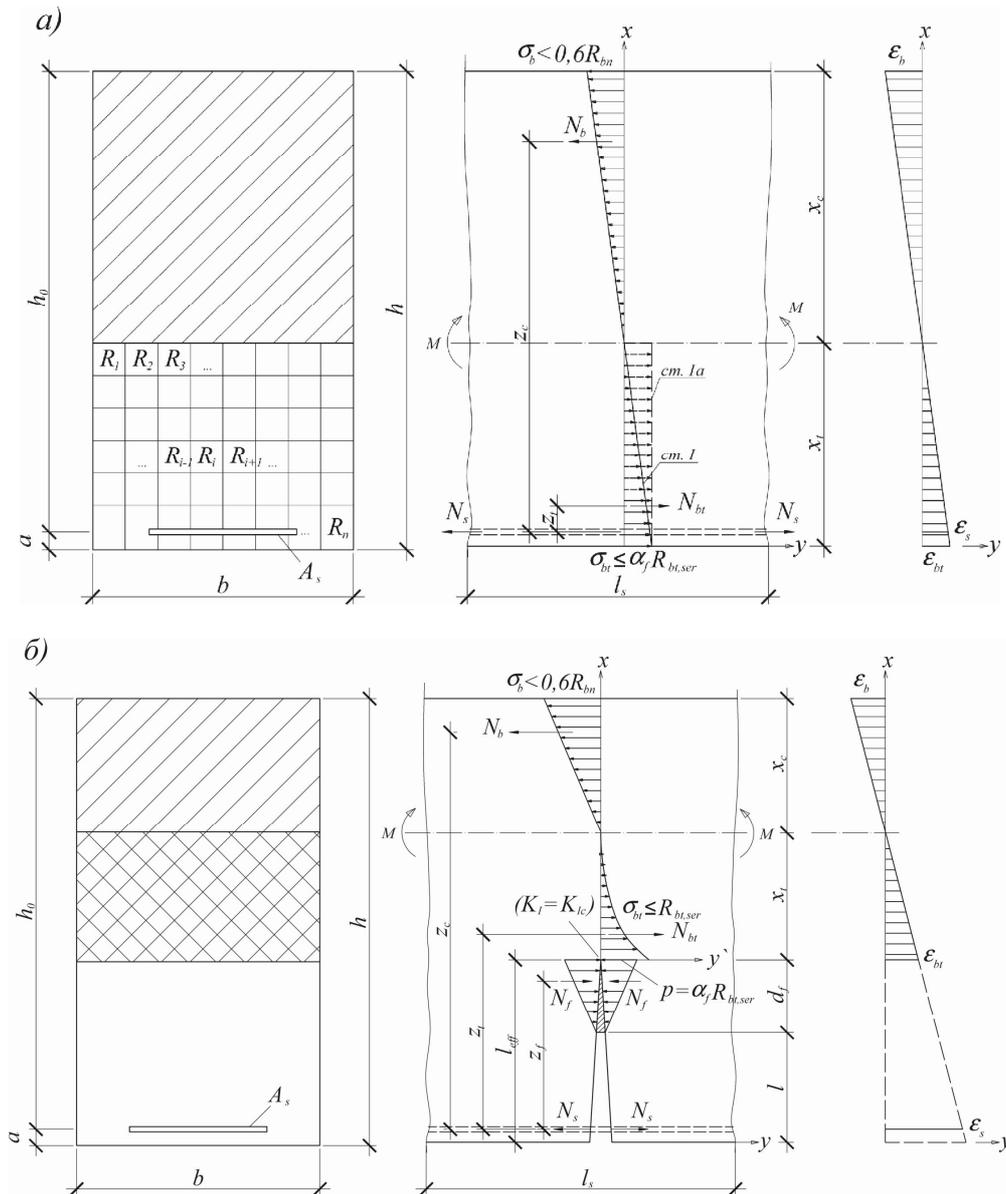


Рис. 1. Расчётная схема сечения:  
а) до и б) после появления макротрещины

В общем виде формула для определения жёсткости сечения относительно его центра тяжести до и после появления макротрещины имеет вид:

$$B = I_{bc}E_b + I_{bt}E_b f[D(M)] + I_s \frac{E_s}{\psi_s}, \quad (1)$$

где  $I_{bc}$ ,  $I_{bt}$ ,  $I_s$  – момент инерции соответственно сжатой зоны бетона, растянутой зоны бетона и растянутой арматуры относительно нейтральной оси;  $E_b$ ,  $E_s$  – модуль деформации соответственно бетона и стальной арматуры;  $\psi_s$  – коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона между смежными макротрещинами (до их появления  $\psi_s=1,0$ );  $f[D(M)]$  – функция снижения модуля деформации бетона растянутой зоны за счёт накопления повреждений:

$$f[D(M)] = 1 - (D_f M) / (a_f M_{crc}), \quad (2)$$

где  $\alpha_f$  – коэффициент, учитывающий, что в экспериментах макротрещины появляются при напряжениях несколько меньших, чем  $R_{bt,ser}$ ,  $D_f$  – параметр повреждаемости при этом ( $\alpha_f=0,88 \div 0,95$ ,  $D_f=0,16 \div 0,32$ ),  $M_{crc}$  – нормативный момент трещинообразования.

Для отыскания значений параметров  $\alpha_f$  и  $D_f$  потребовалось выразить уравнение Л.М.Качанова для эффективных напряжений через статистические параметры и записать его в следующем преобразованном виде:

$$1 - sV_m = \frac{\alpha_f}{1 - D_f}, \quad (3)$$

где  $s$  – показатель надёжности;  $V_m$  – коэффициент вариации прочности бетона на растяжение, устанавливаемый по ГОСТ 18105-86. Параметр повреждаемости в уравнении (3) имеет вероятностную природу:

$$D(s_{bt}) = \int_{R_{bt,ser}}^{s_{bt}} f(R) dR + q, \quad (4)$$

где  $\sigma_{bt}$  – номинальные напряжения в растянутом бетоне;  $f(R)$  – плотность распределения прочности на растяжение по его сечению,  $R_{bt,ser}$  – нормативный предел прочности бетона на растяжение,  $q$  – доверительная вероятность.

Для того, чтобы определить неизвестные величины, входящие в формулу (1), записаны уравнения равновесия и совместности деформаций для сечений на рис. 1:

- до образования макротрещины:

$$\sum M_{N_s} = 0 \quad \Rightarrow \quad M - N_b z_c + N_{bt} z_t = 0, \quad (5)$$

$$\sum Y = 0 \quad \Rightarrow \quad N_b - N_{bt} - N_s = 0, \quad (6)$$

$$e_b / e_{bt} = x_c / x_t, \quad (7)$$

где равнодействующие усилия  $N_b = s_b b x_c / 2$ ,  $N_{bt} = s_{bt} b x_t / 2$ ,  $N_s = s_s A_s$  и соответствующие рисунку расстояния между ними  $z_c = h_0 - x_c / 3$ ,  $z_t = x_t / 3 - a$  – для стадии I,  $z_t = x_t / 2 - a$  – для стадии Ia; высота сжатой и растянутой зоны бетона определяются по геометрическим характеристикам приведённого сечения:

$$x_t = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \frac{b h^2 / 2 + E_s / E_b A_s a}{b h + E_s / E_b A_s}, \quad x_c = h - x_t, \quad (8)$$

- после образования макротрещины:

$$\sum M_{N_s} = 0 \quad \Rightarrow \quad M - N_b z_c + N_{bt} z_t - N_f z_f = 0, \quad (9)$$

$$\sum Y = 0 \quad \Rightarrow \quad N_b - N_{bt} + N_s - N_f = 0 \quad (10)$$

$$e_b / e_{bt} = x_c / x_t, \quad (11)$$

где равнодействующие усилия  $N_b = s_b x_c b / 2$ ,  $N_{bt} = b \int_l^{l+x_t} s_{bt} dx$ ,  $N_f = a_f R_{bt,ser} b d_f / 2$ ,  $N_s = s_s A_s$  и соответствующие рисунку расстояния между ними  $z_c = h_0 - x_c / 3$ ,  $z_t = l - a + \int_l^{l+x_t} s_{bt} x dx / \int_l^{l+x_t} s_{bt} dx$ ,  $z_f = l + 2d_f / 3$ . Высота сжатой и растянутой зоны бетона определяются по геометрическим характеристикам приведённого сечения из уравнения:

$$b x_c^2 / 2 - b x_t^2 / 2 - E_s / E_b A_s (h_0 - x_c) = 0 \quad (12)$$

где  $x_c + x_t + l + d_f = h$ ,  $x$  – текущая координата точки по вертикальной оси с началом координат на нижней растянутой грани элемента.

Растягивающие напряжения над макротрещиной (рис. 1, б) распределяются по криволинейному закону и описываются зависимостью:

$$s_{bt} = \frac{K_I}{\sqrt{2p(x-l)}} + \frac{ME_b}{B} (h - x_c - x) \leq R_{bt,ser}, \quad l \leq x \leq l + x_t, \quad (13)$$

где  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений,  $x$  – текущая координата по вертикальной оси с началом на нижней грани сечения.

Условие старта макротрещины записано в виде:

$$K_I = K_{Ic}, S_{bt}|_{x=l} = R_{bt,ser}, \tag{14}$$

где  $K_{Ic}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений, определяемый экспериментально [9].

Совместное решение уравнений (5÷8) позволяет оценить НДС железобетонного сечения до появления макротрещины и, в том числе, определить высоту сжатой и растянутой зоны бетона  $x_c, x_t$ , значения которых требуются для вычисления жёсткости по формуле (1).

Совместное решение уравнений (9÷14) не позволяет сделать того же после появления макротрещины, так как число неизвестных в этой системе больше числа уравнений. В качестве дополнительного уравнения принята зависимость высоты макротрещины от изгибающего момента в виде:

$$M(l) = M_0 \Phi_I(l) / \Phi_I(l_{ult}), \tag{15}$$

где  $M_0$  – изгибающий момент при полном выключении растянутого бетона из работы (определяется по известной формуле А.С. Залесова [10]);  $\Phi_I$  – тарировочная функция, построенная по результатам конечно-элементного моделирования трещин с применением методик Е.М. Морозова и В.З. Партона [11];  $l_{ult}$  – длина макротрещины, ограниченная сверху сжатой зоной бетона при полном выключении растянутого бетона над ней из работы:

$$l_{ult} = h - \frac{\sqrt{(E_s A_s)^2 + 4E_b b h_0 E_s A_s} - E_s A_s}{2E_b b} \tag{16}$$

В таблице представлены результаты численного определения жёсткости изгибаемого железобетонного элемента сечением  $b \times h = 200 \times 400$  мм из тяжёлого бетона класса В25 при различном проценте армирования:  $\mu = 0,63\%$  (2Ø18 А400),  $\mu = 2,31\%$  (3Ø28 А400),  $\mu = 3,08\%$  (4Ø28 А400). Таблица позволяет сопоставить данные, полученные по четырём различным методикам (см. примечания к таблице). Первые три из них основаны на диаграммном методе расчёта и нелинейной деформационной модели с применением различных диаграмм деформирования бетона. При этом во всех рассмотренных случаях для оценки влияния на жёсткость работы растянутого бетона только над макротрещиной, коэффициент  $\psi_s$  был принят равным 1,0, то есть, таким образом, не учитывалась его работа на участке между макротрещинами. Диаграмма деформирования сжатого бетона и растянутой арматуры в рассмотренных методиках принята линейной. На рис. 2 показаны схемы качественного распределения напряжений и усилий в сечении элемента (с  $\mu = 2,31\%$ ), построенные по разным методикам при одном и том же значении изгибающего момента ( $M = 23$  кН·м).

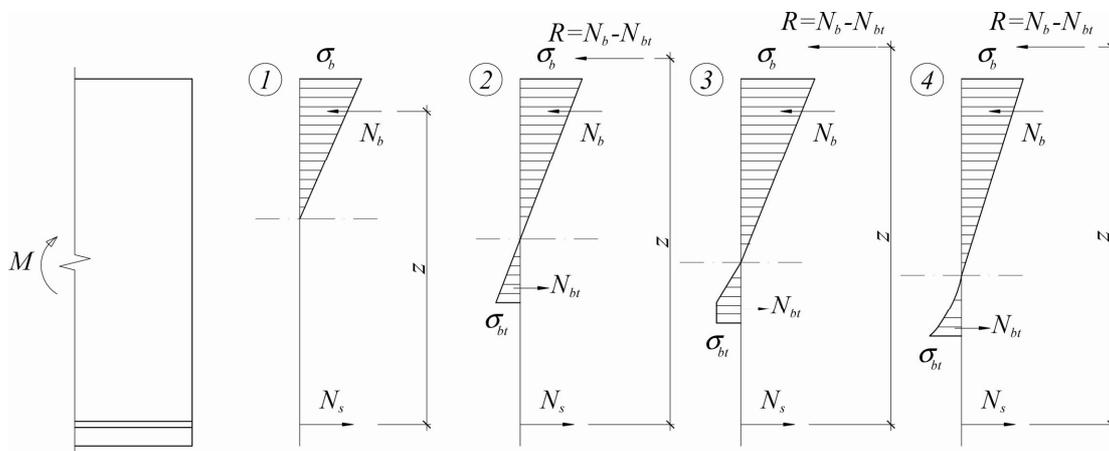


Рис. 2. Схемы распределения напряжений и усилий в сечении железобетонного элемента: номера позиций слева от эюр соответствуют методикам из таблицы

Таблица

## Результаты расчёта жёсткости по различным методикам

R, %	Методика	Момент, кН·м	Расчётные параметры модели						
			l, м	x <sub>l</sub> , м	x <sub>c</sub> , м	σ <sub>bt</sub> , МПа	σ <sub>b</sub> , МПа	σ <sub>s</sub> , МПа	B, 10 <sup>3</sup> ·кН·м <sup>2</sup>
0,63	1	M <sub>1</sub> =17	0,304	0	0,096	0	-4,91	96,98	9,534
		M <sub>2</sub> =50	0,304	0	0,096	0	-14,44	285,24	9,534
	2	M <sub>1</sub> =17	0,272	0,032	0,096	1,279	-5,065	95,23	9,647
		M <sub>2</sub> =50	0,296	0,008	0,096	0,524	-14,447	284,97	9,594
	3	M <sub>1</sub> =17	0,224	0,064	0,112	1,6	-5,33	87,482	10,115
		M <sub>2</sub> =50	0,280	0,024	0,096	1,6	-14,663	283,11	9,609
	4	M <sub>1</sub> =17	0,008	0,184	0,208	1,6	-2,944	14,841	-
		M <sub>2</sub> =50	0,288	0,016	0,096	1,6	-14,617	283,72	9,602
2,31	1	M <sub>1</sub> =23	0,24	0	0,16	0	-4,328	38,59	24,961
		M <sub>2</sub> =95	0,24	0	0,16	0	-17,878	159,4	24,961
	2	M <sub>1</sub> =23	0,168	0,064	0,168	1,585	-4,46	36,115	25,566
		M <sub>2</sub> =95	0,224	0,016	0,168	1,245	-17,931	158,97	24,968
	3	M <sub>1</sub> =23	0,064	0,144	0,192	1,6	-4,267	26,738	30,509
		M <sub>2</sub> =95	0,208	0,032	0,160	1,6	-18,16	158,05	24,999
	4	M <sub>1</sub> =23	0,072	0,128	0,2	1,6	-4,232	24,415	31,990
		M <sub>2</sub> =95	0,216	0,024	0,16	1,6	-17,974	157,86	24,990
3,08	1	M <sub>1</sub> =25	0,224	0	0,176	0	-4,341	32,035	30,013
		M <sub>2</sub> =100	0,224	0	0,176	0	-17,362	128,14	30,013
	2	M <sub>1</sub> =25	0,144	0,072	0,184	1,588	-4,448	29,727	30,891
		M <sub>2</sub> =100	0,208	0,016	0,176	0,992	-17,396	124,87	30,018
	3	M <sub>1</sub> =25	0,008	0,176	0,216	1,6	-4,01	19,032	39,982
		M <sub>2</sub> =100	0,192	0,032	0,176	1,6	-17,47	127,11	30,052
	4	M <sub>1</sub> =25	0,008	0,160	0,232	1,6	-3,831	15,618	44,468
		M <sub>2</sub> =100	0,192	0,032	0,176	1,6	-17,509	126,7	30,070

Примечания:

1 – расчёт по деформационной модели без учёта работы растянутого бетона над макротрещиной;

2 – то же с учётом работы растянутого бетона над макротрещиной и применением линейной диаграммы «σ<sub>bt</sub>-ε<sub>bt</sub>»;

3 – то же с применением двухлинейной диаграммы «σ<sub>bt</sub>-ε<sub>bt</sub>» согласно [2] (E<sub>b1</sub>=E<sub>b</sub>, ε<sub>bt0</sub>=R<sub>bt,ser</sub>/E<sub>b</sub>, ε<sub>bt2</sub>=2ε<sub>bt0</sub>);

4 – по предлагаемой методике;

M<sub>1</sub> – момент, превышающий момент трещинообразования не более, чем на 30 %;

M<sub>2</sub> – момент от эксплуатационной нагрузки (σ<sub>b</sub> ≤ 0,6R<sub>bt</sub>).

Установлено, что максимальная оценка о влиянии растянутого бетона над макротрещиной на жесткость элемента получается по методикам 3 и 4, которые имеют между собой близкие результаты (расхождение в значениях жёсткости сечения составляет 5÷12 %). На рис. 2 этим методикам соответствует и наибольшее значение плеча внутренней пары сил z. При этом привлечение диаграммного метода 3 требует проводить расчёты путём последовательных приближений, что практически исключает возможность рассчитывать конструкции «ручным» методом. Предлагаемая автором методика позволяет это делать без существенного повышения трудоёмкости вычислений в сравнении с нормативным подходом [1].

Из таблицы можно видеть, что наибольшее расхождение при определении величины B между методиками 1 и 4 наблюдается при нагрузке, близкой к моменту трещинообразования (28÷48 %), что особенно выражено в сильноармированных элементах (до 48 %). При действии эксплуатационной нагрузки разница в значениях жёсткости по всем методикам не так значительна (менее 5 %).

Следует отметить, что поскольку кривизна продольной оси железобетонного элемента, работающего с трещинами в растянутой зоне, изменяется непропорционально изменению внешнего момента, то в некоторых случаях для точного определения прогиба элемента требуется вводить интегрирование жёсткости по его отдельным участкам. При этом некоторые участки элемента, в которых  $M > M_{cr}$ , могут оказаться в стадии, близкой к стадии трещинообразования, и учёт работы растянутого бетона над макротрещиной в них, как показано выше, приведёт к увеличению расчётной жёсткости рассматриваемого участка. Это, в свою очередь, снизит расчётный прогиб конструкции и даст возможность получить экономию арматуры при проектировании до 17 % в зависимости от процента армирования и класса бетона по прочности.

#### **Выводы:**

1. Предложена усовершенствованная модель деформирования изгибаемого железобетонного элемента с трещинами, позволяющая в отличие от нормативного подхода [1] определять его жёсткость в стадии эксплуатации с учётом повреждений, работы растянутого бетона над макротрещиной, концентрации напряжений в её вершине, а также наличия зоны предразрушения в ней.

2. Выполнен анализ результатов расчёта жёсткости изгибаемых элементов с различным процентом армирования по предложенной методике и диаграммному методу с применением разных диаграмм деформирования бетона. Установлено, что наибольшее влияние работа растянутого бетона над макротрещиной на жёсткость оказывает при нагрузке, превышающей момент трещинообразования не более, чем на 30 %, что особенно выражено в сильноармированных элементах (до 48 %).

#### **Список литературы**

1. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного натяжения арматуры (к СП 52-102-2003): дата введ. 2004-03-01. – М.: ЦНИИПромзданий, 2005. – 214 с.
2. Боришанский М.С., Немировский Я.М., Николаев Ю.К., Петрова К.В. и др. / под ред. Гвоздева А.А. Исследование напряжённо-деформированного состояния железобетонных элементов с учётом работы растянутого бетона над трещинами и пересмотр на этой основе теории расчёта деформаций и раскрытия трещин // Прочность и жёсткость железобетонных конструкций: сб. научн. ст. – М.: НИИЖБ, 1968. – 232 с.
3. Залесов А.С., Фигаровский В.В. Практический метод расчёта железобетонных конструкций по деформациям. – М.: Стройиздат, 1976. – 104 с.
4. Пирадов К.А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона. – Тбилиси, 1998. – 355 с.
5. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
6. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.
7. Lemaître J. A Course on Damage Mechanics. – Springer-Verlag, 1992. – 210 p.
8. Daniels H. E. The Statistical Theory of the Strength of Bundles of Threads. – I in Proc. R. Soc London A 183, 1945. – P. 405-435.
9. ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении: дата введ. 1992-07-01. – М.: Госстрой СССР, 1992. – 38 с.
10. Залесов А.С., Кодыш Э.Н., Лемеш П.Л., Никитин И.К. Расчёт железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. – М.: Стройиздат, 1988. – 320 с.
11. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

**Radaikin O.V.** – assistant

E-mail: olegxxii@mail.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

## To improve the method of calculating the bending stiffness of reinforced concrete elements without prestressing

### Resume

The article is devoted to improving the methodology of calculation of flexural reinforced concrete elements without prestressing. The carried out research focuses on studying the actual behavior of flexural reinforced concrete structures with cracks, which can lead to a decrease in material consumption. This substantiates the relevance of the work.

The author has added some principles in the physical model of deformation of the considered elements, based on modern achievements of fracture mechanics and the theory of damage. This substantiates the scientific novelty of the work.

Presented an improved model allows to determine the stiffness of the element in the operation stage, taking into account the damage, behavior of concrete in tension over a macrocrack, the stress concentration at crack tip, the fracture process zone in it.

In the model adopted by two separate cross-section calculation schemes of element:

- Before a macrocrack starting the tensile zone of normal section of the element is represented by a bundle fibers model related to H. Daniels. They have different tensile  $R_i$ , due to the development of the initial shrinkage mesocracks in concrete which have different lengths and are described by a normal distribution law. Additionally, the Kachanov-Rabotnov damage ratio parameter is introduced into design equations;

- After a macrocrack starting is considered the equilibrium of reinforced concrete section with an introduction to a Irwin-Orowan mathematical sharp notch, simulating the macrocrack. Also take into account the microcracking at the top of the notch, using the S.P. Sha fictitious crack model.

The analysis of stiffness calculation results of elements with the various the percentage of reinforcement by the proposed methodology and diagramming method with using various diagrams of concrete deformation was carried out. Found that the greatest influence on the stiffness by concrete behavior in tension above the macrocrack has a load exceeding the cracking moment no more than 30 %, which is especially pronounced in heavily reinforced elements.

**Keywords:** bending element, reinforced concrete, stiffness, stress-strain diagram, diagram method, calculation method, fracture mechanics of concrete, cracks, damage.

### References

1. Manual for the design of concrete and reinforced concrete structures of the heavy concrete without prestressing (to SP 52-102-2003): date of typing 2004-03-01. – M.: TsNIIPromzdany, 2005. – 214 p.
2. Borishansky M.S., Nemirovsky J.M., Nikolaev J.K., Petrova K.V., etc., ed. Gvozdev A.A. Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete elements, with the work of the cracked concrete in tension and revision of this calculation based on the theory of deformation and crack opening // Strength and stiffness of reinforced concrete structures: Coll. of sc. art. – M.: NIIZhB, 1968. – 232 p.
3. Zalesov A.S., Figarovskiy V.V. A practical method for calculating the deformations of reinforced concrete structures. – M.: Stroiizdat, 1976. – 104 p.
4. Piradov K.A. Theoretical and experimental foundations of fracture mechanics of concrete and reinforced concrete. – Tbilisi, 1998. – 355 p.
5. Karpenko N.I. General models of the mechanics of reinforced concrete. – M.: Stroiizdat, 1996. – 416 p.
6. Zaitsev Y.V. Fracture Mechanics for builders. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1991. – 288 p.
7. Lemaitre J.A. Course on Damage Mechanics. – Springer-Verlag, 1992. – 210 p.
8. Daniels H.E. The Statistical Theory of the Strength of Bundles of Threads. – I in Proc. R. Soc London A 183, 1945. – P. 405-435.
9. GOST 29167-91 Concrete. Methods for determining the characteristics of crack resistance (fracture toughness) under static loading: date of typing 1992-07-01. – M.: State Committee for Construction of the USSR, 1992. – 38 p.
10. Zalesov A.S., Kodysh E.N., Lemesh P.L., Nikitin I.K. Calculation of reinforced concrete for strength, fracture toughness and deformation. – M.: Stroiizdat, 1988. – 320 p.
11. Morozov E.M., Nikishkov G.P. The finite element method in fracture mechanics. – M.: Nauka, 1980. – 256 p.