

Меркулов С. И., член-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф.,  
Татаренков А. И., канд. техн. наук, доц.,  
Дворников В. М., канд. техн. наук, доц.  
Курский государственный университет

## УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗМЕНЕНИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

dron.79@inbox.ru

В период эксплуатации объектов капитального строительства часто возникает необходимость усиления несущих конструкций, вызванное изменением действующих нагрузок, связанное с перераспределением профиля действующего предприятия или износом строительных конструкций [1, 2].

В проведенном исследовании представлена методика расчета усиления изгибаемых строительных конструкций изменением статической схемы с учетом перераспределения усилий в момент замыкания системы в условиях высокого нагружения конструкции и данная методика позволяет проследить за перераспределением внутренних усилий на момент замыкания системы при ее усилении.

**Ключевые слова** железобетон, конструкции, эксплуатация, несущая способность, высокие уровни нагружения, изменении статической схемы, усиление под нагрузкой.

Для построения расчётных моделей железобетонных конструкций прибегают к исходным предпосылкам, которые упрощают решение задачи. Одной из таких предпосылок является задание закона деформирования бетона.

В рассматриваемой задаче усиление изгибаемых железобетонных элементов осуществляется как за счет увеличения поперечного сечения конструкции дополнительным слоем бетона, так и за счет изменения статической схемы. В результате этого расчетный аппарат должен учитывать предысторию нагружения усиливаемых элементов, разный возраст двух бетонов в сечении, изменяющуюся жесткость и перераспределение внутренних усилий.

Для определения напряженно-деформированного состояния сечений усиливаемой конструкции и элементов усиления используется метод последовательных приближений.

В работе усиливаемой железобетонной стержневой конструкции обычно выделяют три характерных этапа:

1. работа конструкции до усиления на начальные нагрузки;
2. появление дополнительных усилий в стержневой конструкции при ее усилении;
3. работа стержневой конструкции после усиления на возрастающие нагрузки.

На первом этапе проверочные расчеты эксплуатируемых бетонных и железобетонных конструкций следует выполнять с учетом предыстории нагружения конструкции, наличия дефектов и повреждений, изменения граничных условий, трансформации конструктивных систем зданий и сооружений в процессе эксплуатации.

При выполнении проверочных расчетов необходимо учитывать фактические прочност-

ные и деформативные характеристики усиливаемого элемента, а также повреждение бетона силового и не силового характера.

На втором этапе расчета определяется характер напряженно-деформированного состояния конструкций и элементов усиления от совместного действия полезной нагрузки и усилий, действующих на конструкцию.

На третьем этапе расчета определяется характер напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции на возрастающие после усиления нагрузки.

На основании изложенного выше, необходимо выполнять расчет железобетонных конструкций, подлежащих усилению, на всех этапах проектирования реконструкции объекта: проверочный расчет эксплуатируемой конструкции; расчет усиливаемой конструкции на стадии проведения работ по усилению; расчет усиления конструкции.

Первоначально железобетонные балки работают самостоятельно под действием внешней нагрузки. С учетом технологических решений к балкам могут прикладываться различные виды нагрузок.

Зависимость между напряжениями в бетоне и действующим усилием  $M_b$  имеет следующий вид:

$$\int_0^h b(y)\sigma(y)dy = 0; \quad (1)$$

$$M_b = \int_0^h b(y)y_i(y)\sigma(y)dy; \quad (2)$$

При высоких уровнях нагружения в железобетонных конструкциях происходит образование трещин в растянутой зоне, поэтому при со-

ставлении уравнений необходимо учитывать параметры трещинообразования.

Критерием исчерпания несущей способности железобетонной балки является достижение арматурой предела текучести  $\sigma_u$  для сталей с площадкой текучести или предела прочности  $\sigma_{0,2}$  для высокопрочных сталей и достижение сжатым фибровым волокном предельной величины относительной деформации  $\epsilon_{bu}$ .

При построении расчетной модели железобетонной балки для определения напряженно-деформированного состояния воспользуемся диаграммным методом расчета.

$$\epsilon_b(t) = \frac{1}{E_b} \left[ (\sigma_b - \eta R_b)(1 + \phi_t) k_E + \eta R_b (1 + \phi_t) \right] - \frac{\gamma}{E_b} [\sigma_b(t) - \sigma_b], \quad (4)$$

где

$$\gamma = \frac{k_E \cdot \phi_t}{1 - \exp\left(-\frac{k_E \cdot \phi_t}{1 + k_E \cdot \phi_0}\right)} \quad (5)$$

Усиление железобетонных балок осуществляется без разгрузки конструкции, изменением статической схемы и увеличением сечения элементов. Выше было рассмотрено напряженное состояние статически определенных конструкций. На этапе усиления отдельные

Применение диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$  с нефиксированной точкой перелома позволяет из числа общих деформаций выделить упругие и пластические деформации. На основании данной диаграммы разработана методика расчета составных железобетонных конструкций. Пластические свойства бетонов характеризуются коэффициентом пластичности  $\lambda_b$ :

$$\lambda_b = \epsilon_{pl} / \epsilon_b, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{pl}$ ,  $\epsilon_b$  – соответственно пластические и полные деформации при кратковременном действии нагрузки.

Процесс деформирования бетона в любой момент времени описывается уравнением:

элементы объединяются в единую конструкцию путем установки дополнительной арматуры, размещаемой над опорными участками, и дополнительно уложенным слоем бетона. Измененная расчетная схема представлена на рис. 1.

В результате рассматриваемого усиления до приложения дополнительной нагрузки в системе наблюдается перераспределение внутренних усилий с пролетных участков отдельных балок на опорные участки.

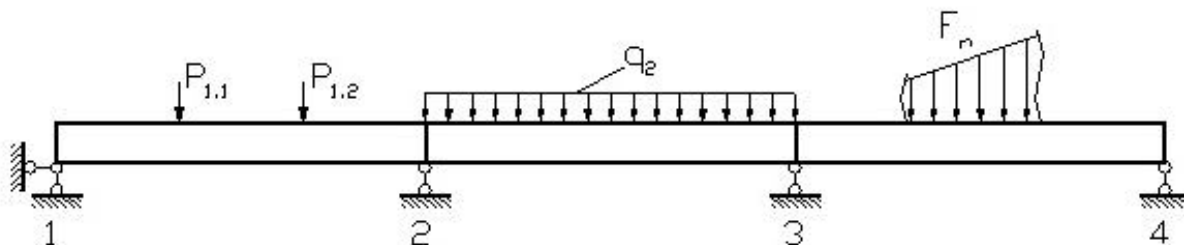


Рис. 1. Расчетная схема после усиления конструкции

В сечении усиленной балки работает бетон с различными физико-механическими характеристиками. На границе двух бетонов наблюдается скачок напряжений и деформаций, что является следствием загрузки неусиленной части конструкции. Величина этого скачка будет

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ X_{kj} \delta_{ikj}(t) + \int_0^t \frac{dX_k(\tau)}{d\tau} \delta_{ikj}(t, \tau) d\tau \right] + \sum_{j=1}^m \Delta_{ipj}(t) = 0; \quad (i=1, 2...n); \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=10}^m \int \frac{dX_k(\tau)}{d\tau} \delta_{ikj}(t, \tau) d\tau + \sum_{j=1}^m \Delta_{ipj}(t) = 0. \quad (7)$$

Исследованиями А.Б. Гольшева показано, что выражения (6) и (7) можно привести к виду

определяться напряженно-деформируемым состоянием неусиленного элемента.

Для оценки изменения напряженно-деформированного состояния полученной системы каноническая форма метода сил приводит к решению уравнений:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ X_{k\ ikj} \delta_{ikj}(t) + X_{\dot{a}k\ ikj} \delta_{ikj}(t_0, t) \right] + \sum_{j=1}^m \Delta_{ipj}(t) = 0; \tag{8}$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m X_{\dot{a}k\ ikj} \delta_{ikj}(t_0, t) + \sum_{j=1}^m \Delta_{ipj}(t) = 0, \tag{9}$$

где  $\delta_{ikj}(t_0, t)$  – средние значения  $\delta_{ikj}(t)$  в интервале времени 0 – t.

Решение уравнений, записанных для n-й опоры, можно представить так:  
– при замыкании системы до нагружения:

$$\begin{aligned} & M_{n-1}(t) \frac{L_n \gamma_n^M}{E_{b(n)} I_n} + 2M_n(t) \left[ \frac{L_n \gamma_n^M}{E_{b(n)} I_n} + \frac{L_{n+1} \gamma_{n+1}^M}{E_{b(n+1)} I_{n+1}} \right] + M_{n+1}(t) \frac{L_{n+1} \gamma_{n+1}^M}{E_{b(n+1)} I_{n+1}} + \\ & + M_{n-1} \frac{L_n (1 + \varphi_n^M - \gamma_n^M)}{E_{b(n)} I_n} + \\ & 2M_n \left[ \frac{L_n (1 + \varphi_n^M - \gamma_n^M)}{E_{b(n)} I_n} + \frac{L_{n+1} (1 + \varphi_{n+1}^M - \gamma_{n+1}^M)}{E_{b(n+1)} I_{n+1}} \right] + \\ & + M_{n+1} \frac{L_{n+1} (1 + \varphi_{n+1}^M - \gamma_{n+1}^M)}{E_{b(n+1)} I_{n+1}} = -6 \left[ \Delta_{(n)p}(t) + \widehat{\Delta}_{(n)c} + \Delta_{(n)y}(t) \right] \end{aligned} \tag{10}$$

– при замыкании системы после нагружения:

$$\begin{aligned} & M \ddot{A}_{(n-1)}(t) \frac{L_n \gamma_n^M}{E_{b(n)} I_n} + 2M \ddot{A}_{(n)}(t) \left[ \frac{L_n \gamma_n^M}{E_{b(n)} I_n} + \frac{L_{n+1} \gamma_{n+1}^M}{E_{b(n+1)} I_{n+1}} \right] + \\ & M \ddot{A}_{(n+1)}(t) \frac{L_{n+1} \gamma_{n+1}^M}{E_{b(n+1)} I_{n+1}} = -6 \left[ \Delta_{(n)p}(t) + \widehat{\Delta}_{(n)c} + \Delta_{(n)y}(t) \right]. \end{aligned} \tag{11}$$

Решение системы исходных уравнений позволяет определять, при действии нагрузки любого уровня, внутренние усилия, напряжения, кривизны, прогибы. Алгоритм решения задачи реализуется итерационным способом.

После замыкания системы и изменении статической схемы необходимо рассматривать два участка работы новой конструкции при перераспределении усилий и увеличении внешней нагрузки.

Для первого участка характерно значительное увеличение внутренних напряжений в пролете, где, возможно, бетоном или арматурой бу-

дут достигнуты предельные значения деформаций. Во втором случае необходимо рассмотреть надопорный участок, где вследствие перераспределения усилий и восприятия дополнительных приложенных нагрузок могут достигнуть предельных деформаций бетон или арматура усиления.

Схема распределения напряжений и деформаций представлена на рисунке 2.

После интегрирования выражения (1) получим сумму внутренних усилий на продольную ось балки для варианта (рис. 3, а):

$$bh_{ad} \omega_{ad} \sigma_{b,ad} + bx \omega_{b} \sigma_{b} - bx_{bt} \omega_{bt} R_{bt} + \sigma_{s,ad} A_{s,ad}' + \sigma_s' A_s' - \sigma_{st} A_s = 0. \tag{12}$$

Интегрированием уравнения (3) определим момент внутренних усилий относительно нейтральной оси:

$$M_u = bh_{ad} \omega_{ad} \sigma_{b,ad} y_{ad} + bx \omega_{b} \sigma_{b} y_b - bx_{bt} \omega_{bt} R_{bt} y_{bt} + \sigma_s' A_s' y_s' + \sigma_{st} A_s y_s. \tag{13}$$

Для второго варианта (рис. 3, б):

$$bx_{ad}\omega_{ad}\sigma_{b,ad}'' - bx_{bt}\omega_{bt}R_{bt,ad} + \sigma_{s,ad}'' A_{s,ad}' = 0; \quad (14)$$

$$M = bx_{ad}\omega_{ad}\sigma_{b,ad}'' y_{ad}'' - bx_{bt}\omega_{bt}R_{bt,ad} y_{bt}'' + \sigma_{s,ad}'' A_{s,ad}'' \cdot (15)$$

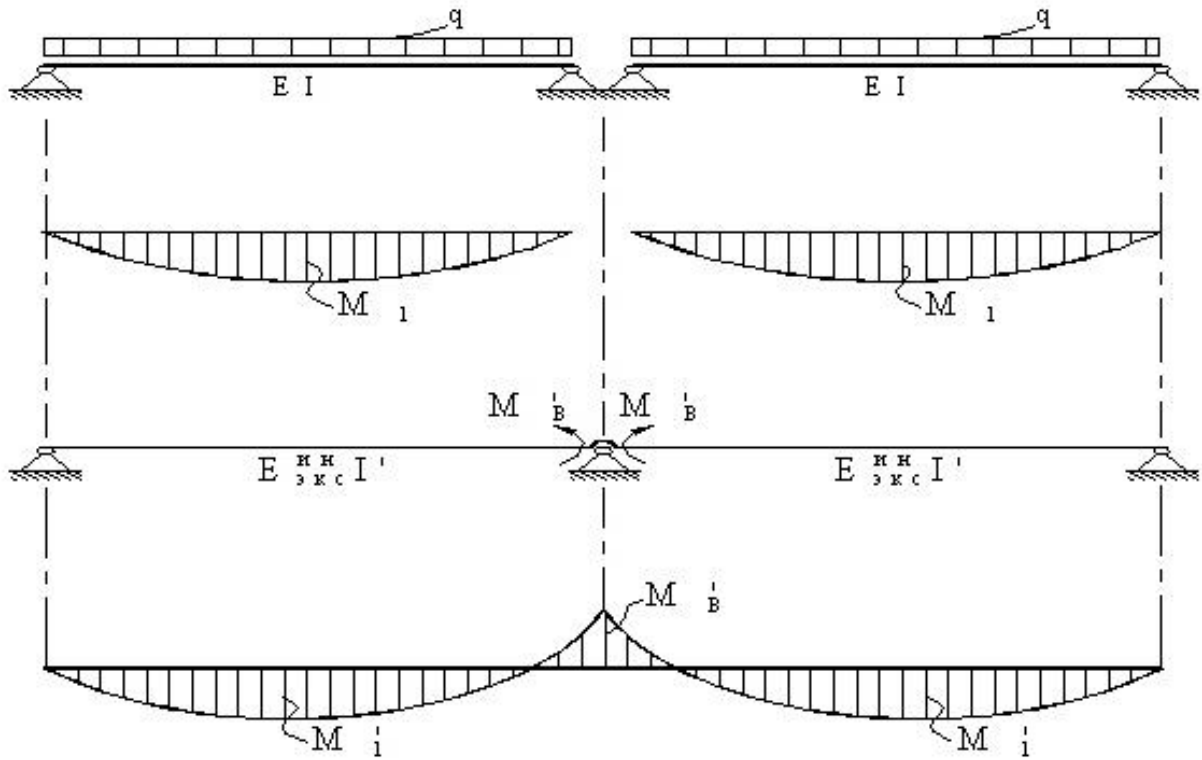


Рис. 2. Изменение статической схемы конструкции при усилении

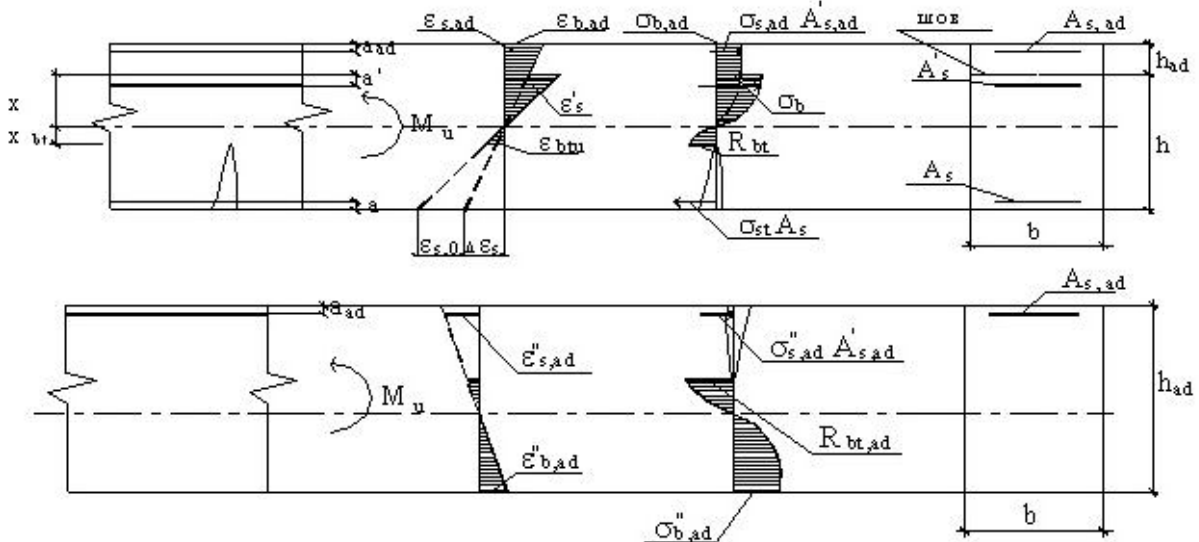


Рис. 3. Схема распределения деформаций и напряжений в усиленной конструкции:  
а – в пролете; б – на опоре

Применяя полученный расчётный аппарат, можно описать напряжённо-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов, усиленных под нагрузкой с изменением статической схемы конструкции на всех стадиях работы – от момента нагружения неусиленной системы до исчерпания несущей способности усиленной под нагрузкой конструкции. Данная методика позволяет проследить за перераспределением внутренних усилий на момент замыкания системы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркулов С.И. Конструктивная безопасность эксплуатируемых железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №4. С.53 – 54.
2. Меркулов С.И., Татаренков А.И., Меркулов Д.С. Исследования усиленных железобетонных конструкций // Известия высших учебных заведений. Строительство. Новосибирск. НГАСУ, 2009. №9. С. 123-129.