

Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил

*Д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой М.Н. Серазутдинов;
К.т.н., доцент М.Н. Убайдуллоев**

ФГБОУ ВПО Казанский национальный исследовательский технологический университет

Ключевые слова: усиление; ремонтные напряжения; монтажные напряжения; вариационный метод

Здания и сооружения в процессе эксплуатации подвергаются разнообразным внешним воздействиям, что приводит к постепенному снижению их несущей способности. Вследствие этого возникает необходимость ремонта и усиления поврежденных элементов конструкций. Реконструкция и техническое перевооружение промышленных предприятий приводит в большинстве случаев к увеличению эксплуатационных нагрузок, что также вызывает потребность в увеличении несущей способности сооружений.

В настоящее время существуют теоретические разработки и практические методы по определению несущей способности усиливаемых статически определимых конструкций [1, 2].

Методика определения эффективности усиления эксплуатируемых статически неопределимых конструкций с учетом пластических деформаций рассмотрена в работах [3, 4]. В отмеченных публикациях особенности прочности и деформирования конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии, изучались в основном для элементов, имеющих простейшие формы поперечного сечения.

Способы расчета усиливаемых сжатых железобетонных конструкций описаны в [5]. В этой работе основное внимание уделено проблеме устойчивости элементов.

Вопросы реконструкции и ремонта старинных стальных балочных конструкций и дальнейшее их использование в качестве несущих конструкций междуэтажных перекрытий изложены в [6].

Вариационному методу расчета напряженно-деформированного состояния усиливаемых нагруженных конструкций посвящены работы [7, 8]. В статье [7] рассмотрен расчет усиливаемой рамной конструкции способом увеличения сечения. Метод расчета усиленной стержневой конструкции в случае, когда при усилении проводятся монтажные работы, вызывающие возникновение дополнительных монтажных напряжений, изложен в [8]. Приведен расчет напряженно-деформированного состояния усиливаемой статически определимой балки при возникновении только упругих деформаций.

Публикации [9, 10] посвящены методу усиления конструкций предварительным напряжением. В статье [9] изложена методика конечно-элементного моделирования и расчета усиления конструкции предварительно напряженными канатами. Установлено, что использование предварительного напряжения позволяет не только усилить конструкцию, но и ликвидировать уже имеющиеся прогибы и трещины.

Различные вопросы усиления и деформирования нагруженных стальных конструкций рассмотрены в [11, 12, 13]. Результаты конечно-элементного анализа нагруженной стальной балки, усиливаемой способом наращивания сечения, изложены в [11]. Методы усиления конструкции эксплуатируемых стальных железнодорожных мостов приведено в [12], где даны результаты расчетов 3D модели конструкции усиливаемого моста методом конечных элементов.

Влияние монтажных напряжений на напряженно деформированное состояние усиливаемых нагруженных конструкций рассмотрено в монографии [13]. Как отмечается в [13], изложенные в нем методики по расчету усиленных под нагрузкой стержневых систем можно рассматривать лишь как первое приближение, нуждающееся в дополнительной проверке с помощью численных методов расчета.

В коммерческих компьютерных программах, используемых в настоящее время для расчетов, не учитываются некоторые особенности, возникающие при моделировании напряженно-деформированного состояния конструкций, усиленных при действии на них нагрузки.

Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил

Указанные факторы определяют необходимость применения специальных разработок по методам расчета усиленных конструкций.

В данной статье излагается метод расчета усиливаемых нагруженных статически неопределимых конструкций. В отличие от ранее опубликованных работ авторов [7, 8], здесь рассматривается вариационный метод расчета стержневых систем, усиливаемых как способами увеличения сечения элементов, так и изменением конструктивной и расчетной схемы конструкций путем установки дополнительных элементов (устройством оттяжек и контрфорсов, постановкой подкосов, связевых элементов). Исследуются вопросы влияния монтажных напряжений и последовательности выполнения этапов усиления на степень повышения несущей способности усиливаемых стержневых систем. Предполагается, что деформации являются упругими.

Особенности усиленных под нагрузкой элементов рассмотрим на примере усиления сжато-изогнутого стержня, находящегося под воздействием изгибающего момента M^P и продольной силы N^P и имеющего начальный прогиб $f(x)$ (рис. 1, а). В сечении основного элемента 1 действуют ремонтные напряжения σ_x^P (рис. 2,а). При усилении элемента способом увеличения сечений к деформированному стержневому элементу 1 присоединяется прямолинейный усиливающий стержень 2. Для обеспечения прилегания стержни 1 и 2 прижимаются друг к другу с помощью специальных стяжных устройств (струбцины, хомуты, различные стяжки). От действия монтажных сил F_j^M , возникающих при прижатии стержней, элементы усиления изгибаются (рис. 1,б), зазор $f(x)$ между ними устраняется. При этом от воздействия сил F_j^M , в конструкции возникают дополнительные (монтажные) напряжения σ_x^M (рис. 2,в). При нагружении конструкции дополнительными эксплуатационными силами в сечениях усиленного элемента возникают дополнительные напряжения $\Delta\sigma_x$ (рис. 2,г). В случае возникновения только упругих деформаций значения σ_x^P , σ_x^M и $\Delta\sigma_x$ складываются, т.е. $\sigma_x^y = \sigma_x^P + \sigma_x^M + \Delta\sigma_x$ (рис. 2, д).

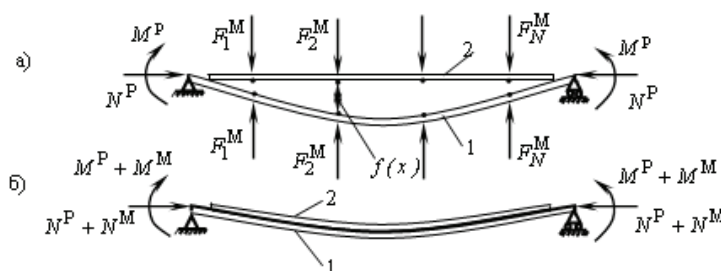


Рисунок 1. Расчетная схема к определению монтажных сил

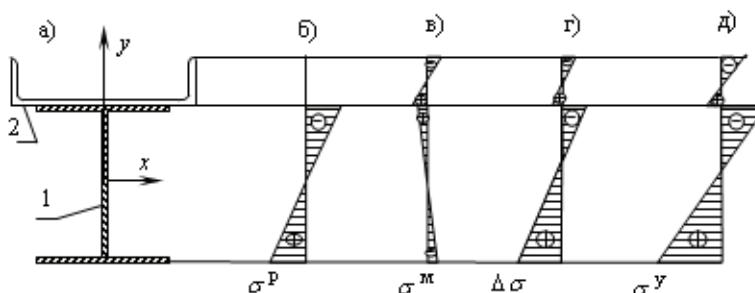


Рисунок 2. Напряжения в поперечных сечениях стержней

Таким образом, для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции необходимо учесть наличие в некоторой области ремонтных напряжений, присоединение дополнительных элементов и возникновение монтажных напряжений. Последовательность расчетов по определению напряженно-деформированного состояния усиливаемой конструкции следующая:

- 1) расчет напряженно-деформированного состояния исходной упругой стержневой системы при действии ремонтных нагрузок;
- 2) определение сил, возникающих при монтаже элементов усиления, с учетом наличия

Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил

ремонтных нагрузок, ремонтных напряжений и деформаций;

3) вычисление значения монтажных напряжений с учетом действия ремонтных нагрузок и монтажных сил;

4) введение в расчетную схему конструкции дополнительных стержневых элементов, моделирующие соединение прижатых друг к другу стержней на болтах;

5) введение дополнительных конструктивных элементов путем изменения расчетной схемы конструкции (при необходимости);

6) определение напряженно-деформированного состояния конструкции после усиления при действии эксплуатационных нагрузок с учетом ремонтных и монтажных напряжений, присоединения дополнительных элементов.

Для решения задачи использовался вариационный метод. Этот метод позволяет учитывать такие особенности, как изменение размеров поперечного сечения стержня и последующее дополнительное нагружение конструкции, наложение напряжений, обусловленные различными факторами.

Принимались основные допущения и соотношения теории стержней с учетом сдвигов [14]. Перемещения стержневой системы в период усиления при действии ремонтных нагрузок находятся из условия:

$$\delta U - \delta W = 0, \quad (1)$$

где δU – вариация потенциальной энергии деформации стержневой системы; δW – вариация работы внешних сил.

При решении задачи вводится глобальная ортогональная система координат $0\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$, вектор перемещения точек продольной оси стержня $\bar{u} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3\}^T$ и вектор углов поворота поперечных сечений $\bar{\varphi} = \{\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2, \tilde{\varphi}_3\}^T$. Компоненты этих векторов определены в системе координат $0\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$.

Для определения напряженно-деформированного состояния исходной упругой стержневой системы в случае действия ремонтных нагрузок полагается:

$$\begin{aligned} \delta U &= \int_{l_C} \iint_{A^P} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_y \delta \gamma_{xy} + \tau_z \delta \gamma_{xz}) dA dl \\ \delta W &= \int_{l_q} (\tilde{q}_1^P \delta \tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^P \delta \tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^P \delta \tilde{u}_3) dl + \sum_n (\tilde{F}_{1n}^P \delta \tilde{u}_1(x_n) + \tilde{F}_{2n}^P \delta \tilde{u}_2(x_n) + \tilde{F}_{3n}^P \delta \tilde{u}_3(x_n)) + \\ &+ \sum_k (\tilde{M}_{1k}^P \tilde{\varphi}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^P \tilde{\varphi}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^P \tilde{\varphi}_{3k}(x_k)), \end{aligned} \quad (2)$$

где l_C , A^P – длина и площадь поперечных сечений стержней усиливаемой системы; \tilde{q}_1^P , \tilde{q}_2^P , \tilde{q}_3^P , \tilde{F}_{1n}^P , \tilde{F}_{2n}^P , \tilde{F}_{3n}^P , \tilde{M}_{1k}^P , \tilde{M}_{2k}^P , \tilde{M}_{3k}^P – распределенные нагрузки, сосредоточенные силы и моменты, действующие во время ремонта.

Перемещения $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3$, углы поворота $\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2, \tilde{\varphi}_3$ и деформации вычисляются в локальной ортогональной системе координат $0xyz$ с осью $0x$, направленной по касательной к продольной оси стержня [15].

Полагаем, что в поперечных сечениях стержней возникают деформации:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{du_1}{dx} - y \frac{d\varphi_3}{dx} + z \frac{d\varphi_2}{dx}, \quad \gamma_{xy} = f_1(y, z) \left[\frac{du_2}{dx} - \varphi_3 \right] - f_2(y, z) \frac{d\varphi_1}{dx}, \\ \gamma_{xz} &= f_1^*(y, z) \left[\frac{du_2}{dx} + \varphi_2 \right] + f_2^*(y, z) \frac{d\varphi_1}{dx}, \end{aligned}$$

где $f_1(y, z)$, $f_2(y, z)$, $f_1^*(y, z)$, $f_2^*(y, z)$ – некоторые функции, конкретный вид которых зависит от вида деформации, формы поперечного сечения стержня, положения начала системы координат $0xyz$.

Отметим, что функции $f_1(y, z)$, $f_1^*(y, z)$ должны описывать распределение деформаций и напряжений в сечении стержня при изгибе, а $f_2(y, z)$, $f_2^*(y, z)$ – при кручении.

Например, для стержня с поперечным сечением в виде круга радиуса R для центральных осей $Oxyz$ при косом изгибе с кручением:

$$f_1(y, z) = \frac{4}{3} [1 - (y/R)^2]; \quad f_1^*(y, z) = \frac{4}{3} [1 - (z/R)^2]; \quad f_2(y, z) = z; \quad f_2^*(y, z) = y.$$

Для стержня с поперечным сечением в виде прямоугольника со сторонами h и b ($-0.5h \leq z \leq 0.5h$, $-0.5b \leq y \leq 0.5b$) при косом изгибе:

$$f_1(y, z) = 6 [0,25 - (y/b)^2]; \quad f_1^*(y, z) = 6 [0,25 - (z/h)^2]; \quad f_2(y, z) = f_2^*(y, z) = 0.$$

Стержневая система разбивается на N участков, на каждом из которых компоненты векторов \tilde{u} и $\tilde{\varphi}$ представляются в следующем виде:

$$\tilde{u}_k = \tilde{u}_k^i = \sum_{m=1}^M C_{km}^i f_m(t), \quad \tilde{\varphi}_k = \tilde{\varphi}_k^i = \sum_{m=1}^M D_{km}^i f_m(t). \quad (3)$$

Здесь $f_1(t) = 1-t$, $f_2(t) = t$, $f_m(t) = (1-t)t^{m-2}$, $m = \overline{3, M}$; C_{km}^i , D_{km}^i – неизвестные постоянные; $t = x/l_i$ ($0 \leq t \leq 1$); x – длина продольной оси стержня, отсчитываемая от начала участка до рассматриваемой точки; l_i – длина участка стержня; $k = 1, 2, 3$; $i = \overline{1, N}$.

Перемещения и углы поворота в локальной и глобальной системах координат связаны соотношениями:

$$u_j = \sum_{k=1}^3 n_{jk} \tilde{u}_k, \quad \varphi_j = \sum_{k=1}^3 n_{jk} \tilde{\varphi}_k, \quad j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где n_{jk} – направляющие косинусы локальной системы координат.

Для определения коэффициентов C_{km}^i и D_{km}^i в (3) удовлетворяются кинематические граничные условия, а также условия стыковки перемещений u и углов поворота φ на границах участков стержней. Затем, после подстановки выражений (2) в условие (1) и интегрирования получим систему алгебраических уравнений:

$$[K]\{C\} = \{F\}. \quad (5)$$

Здесь $[K]$ – матрица жесткости стержневой конструкции; $\{C\}$ – вектор неизвестных постоянных; $\{F\}$ – вектор внешних нагрузок.

Решая систему уравнений (5), находим неизвестные коэффициенты C_{km}^i , D_{km}^i .

С использованием выражений (2) и (3) определяются перемещения стержней. Затем подсчитываются деформации $\varepsilon_x, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}$ и напряжения $\sigma_x^p, \tau_{xy}^p, \tau_{xz}^p$, возникающие в конструкции при ремонте.

При вычислении монтажных сил полагаем, что усиливаемый стержень искривлен, поэтому между усиливаемым и усиливающим элементами имеется зазор $f(x)$. Для устранения этого зазора к стержням прикладываются N_F пар сосредоточенных сил F_j^M ($j = 1, 2, \dots, N_F$), действующих перпендикулярно к линии AB в точках с координатами x_j (рис. 1, а).

Обозначим через f_i – расстояния между точками в паре с номером i ($i = 1, 2, \dots, N_T$), Δw_{ij}^1 – изменение расстояния между точками в паре с номером i при действии единичных сил $F_j^M = 1$ ($j = 1, 2, \dots, N_F$). В случае действия всей системы сил F_j^M , изменения расстояния между стержнями в выбранных точках:

Серзутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил

$$w_i = \sum_{j=1}^{N_F} \Delta w_{ij}^1 F_j^M, \quad i = \overline{1, N_T}. \quad (6)$$

Нужно найти такие значения F_j^M , чтобы выполнялось условие:

$$w_i = f_i, \quad i = \overline{1, N_T}. \quad (7)$$

Таким образом, сближающие стержни монтажные силы считаются сосредоточенными силами $F_j^M = 1$ ($j = 1, 2, \dots, N_F$). Условие сближения стержней имеет вид (7). Перемещения точек в направлении перпендикулярном к линии АВ (рис. 1,а), определяются по формуле (6). Величины F_j^M должны быть такие, чтобы выполнялись условия (7).

Для нахождения F_j^M после подстановки выражения w_i в виде (6) в равенство (7) записывается следующая система алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=1}^{N_F} \Delta w_{ij}^1 F_j^M = f_i, \quad i = \overline{1, N_T}. \quad (8)$$

В результате действия сил F_j^M указанные стержни сближаются, и в деформируемой конструкции возникнут дополнительные (монтажные) напряжения, связанные с монтажом усиливаемых элементов.

Изменение расстояний между точками Δw_{ij}^1 в паре с номером i при действии единичных сил $\tilde{F}_j^M = 1$ ($j = 1, 2, \dots, N_F$) определяется из условия (1) по методике, изложенной в [8]. Затем, решая систему алгебраических уравнений (8), находят величины монтажных сил \tilde{F}_j^M .

На следующем этапе вычисляются монтажные напряжения $\sigma_x^M, \tau_{xy}^M, \tau_{xz}^M$. При этом учитывается действие ремонтных нагрузок и монтажных сил, а также наличие ремонтных напряжений $\sigma_x^p, \tau_{xy}^p, \tau_{xz}^p$. Расчеты проводятся вариационным методом на основе уравнения (1), при записи которого используются следующие выражения:

$$\begin{aligned} \delta U = & \int_{l_C} \iint_{A^p} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_y \delta \gamma_{xy} + \tau_z \delta \gamma_{xz}) dA dl + \int_{l^{ycm}} \iint_{A^{ycm}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_y \delta \gamma_{xy} + \tau_z \delta \gamma_{xz}) dA dl + \\ & + \int_{l_C} \iint_{A^p} (\sigma_x^p \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^p \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^p \delta \gamma_{xz}) dA dl, \\ \delta W = & \int_{l_q} (\tilde{q}_1^p \delta \tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^p \delta \tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^p \delta \tilde{u}_3) dl + \sum_n (\tilde{F}_{1n}^p \delta \tilde{u}_1(x_n) + \tilde{F}_{2n}^p \delta \tilde{u}_2(x_n) + \tilde{F}_{3n}^p \delta \tilde{u}_3(x_n)) + \\ & + \sum_k (\tilde{M}_{1k}^p \tilde{\varphi}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^p \tilde{\varphi}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^p \tilde{\varphi}_{3k}(x_k)) + \sum_j^{N_F} (\tilde{F}_j^M \delta \tilde{u}_1(x_j) + \tilde{F}_j^M \delta \tilde{u}_2(x_j) + \tilde{F}_j^M \delta \tilde{u}_3(x_j)). \end{aligned}$$

На последнем этапе стяжные устройства убираются. Рассчитывается действие на конструкцию эксплуатационных нагрузок. Следовательно, для проведения расчетов в расчетной схеме нужно убрать монтажные силы \tilde{F}_j^M и ввести дополнительные стержневые элементы, моделирующие соединение прижатых друг к другу стержней болтами. Также, при необходимости, для увеличения жесткости стержневой системы вводятся новые стержневые элементы, т.е. изменяется расчетная схема конструкции.

Напряженно-деформированное состояние конструкции после усиления определяется с учетом действия эксплуатационных нагрузок, наличия ремонтных $\sigma_x^p, \tau_{xy}^p, \tau_{xz}^p$ и монтажных $\sigma_x^M, \tau_{xy}^M, \tau_{xz}^M$ напряжений. Также следует учитывать, что вводятся дополнительные элементы, моделирующие соединение прижатых друг к другу стержней болтами и новые стержни, которые изменяют расчетную схему усиливаемой конструкции.

Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил

Выражения δU в этом случае записывается с учетом напряжений, действующих в период усиления:

$$\begin{aligned} \delta U = & \int_{l_c} \left[\iint_{A^p} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \right. \\ & \left. + \iint_{A^p} ((\sigma_x^p + \sigma_x^m) \delta \varepsilon_x + (\tau_{xy}^p + \tau_{xy}^m) \delta \gamma_{xy} + (\tau_{xz}^p + \tau_{xz}^m) \delta \gamma_{xz}) dA \right] dl + \\ & + \int_{l^{усм}} \left[\iint_{A^{усм}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \iint_{A^{усм}} (\sigma_x^m \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^m \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^m \delta \gamma_{xz}) dA \right] dl + \\ & + \int_{l^B} \iint_{A^B} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA dl + \int_{l^{усд}} \left[\iint_{A^{усд}} (\sigma_x \delta \varepsilon_x + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}) dA + \right. \\ & \left. + \iint_{A^{усд}} (\sigma_x^m \delta \varepsilon_x + \tau_{xy}^m \delta \gamma_{xy} + \tau_{xz}^m \delta \gamma_{xz}) dA \right] dl. \end{aligned} \quad (9)$$

В выражениях (9) l_B и A^B – соответственно длина и площадь поперечных сечений стержневых элементов, моделирующих соединение прижатых друг к другу стержней болтами, $l^{усд}$ и $A^{усд}$ – соответственно длина и площадь дополнительно введенных стержней.

Вариация работы внешних сил имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \delta W = & \int_{l_q} (\tilde{q}_1^y \delta \tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^y \delta \tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^y \delta \tilde{u}_3) dl + \sum_i (\tilde{F}_{1i}^y \delta \tilde{u}_1(x_i) + \tilde{F}_{2i}^y \delta \tilde{u}_2(x_i) + \tilde{F}_{3i}^y \delta \tilde{u}_3(x_i)) + \\ & + \sum_k (\tilde{M}_{1k}^y \tilde{\varphi}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^y \tilde{\varphi}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^y \tilde{\varphi}_{3k}(x_k)). \end{aligned}$$

Интенсивности внешних распределенных нагрузок $\tilde{q}_1^y, \tilde{q}_2^y, \tilde{q}_3^y$, проекции сосредоточенных сил $\tilde{F}_{1i}^y, \tilde{F}_{2i}^y, \tilde{F}_{3i}^y$, внешние сосредоточенные моменты $\tilde{M}_{1k}^y, \tilde{M}_{2k}^y, \tilde{M}_{3k}^y$ относительно осей координат вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_1^y &= \tilde{q}_1^p + \Delta \tilde{q}_1, & \tilde{q}_2^y &= \tilde{q}_2^p + \Delta \tilde{q}_2, & \tilde{q}_3^y &= \tilde{q}_3^p + \Delta \tilde{q}_3; \\ \tilde{F}_{1i}^y &= \tilde{F}_{1i}^p + \Delta \tilde{F}_{1i}, & \tilde{F}_{2i}^y &= \tilde{F}_{2i}^p + \Delta \tilde{F}_{2i}, & \tilde{F}_{3i}^y &= \tilde{F}_{3i}^p + \Delta \tilde{F}_{3i}; \\ \tilde{M}_{1k}^y &= \tilde{M}_{1k}^p + \Delta \tilde{M}_{1k}, & \tilde{M}_{2k}^y &= \tilde{M}_{2k}^p + \Delta \tilde{M}_{2k}, & \tilde{M}_{3k}^y &= \tilde{M}_{3k}^p + \Delta \tilde{M}_{3k}, \end{aligned}$$

где $\Delta \tilde{q}_1, \Delta \tilde{q}_2, \Delta \tilde{q}_3, \Delta \tilde{F}_{1i}, \Delta \tilde{F}_{2i}, \Delta \tilde{F}_{3i}, \Delta \tilde{M}_{1k}, \Delta \tilde{M}_{2k}, \Delta \tilde{M}_{3k}$ – дополнительные нагрузки, связанные с эксплуатацией усиленной конструкции.

Для вычисления интегралов, которые содержатся в уравнении (9), используется численное интегрирование с использованием формулы Гаусса. Интегрирование проводится по длине стержней и по площади их поперечных сечений.

На основе изложенной методики составлена компьютерная программа, которая позволяет моделировать работу усиливаемой конструкции и определять его напряженно-деформированное состояние на различных этапах с учетом деформаций и напряжений, действующих во время усиления. Достоверность и высокая точность расчетов этой программы установлена на основе сравнения полученных результатов с данными решения тестовых примеров и задач, решения которых получены другими методами.

Рассмотрен пример усиления рамной конструкции, приведенной на рис. 3а, способом увеличения стойки 2 рамы и введением дополнительных стержневых элементов 6 (изменением расчетной схемы конструкции). Сечение основных элементов рамы (стержни 1, 2, 3, 4), усиливающего элемента 5 и дополнительных усиливающих стержней 6 – двутавр № 33. Изучался вопрос о влиянии последовательности выполнения этапов усиления статически неопределимой конструкции на эффективность усиления. Показателем эффективности усиления эксплуатируемых сооружений, как известно [1], является величина θ , равная отношению несущей способности усиленного сооружения S^y к той несущей способности S , которой оно обладало до усиления:

Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н. Усиление нагруженных стержневых конструкций с учетом влияния ремонтных и монтажных сил

$$\theta = S^y / S.$$

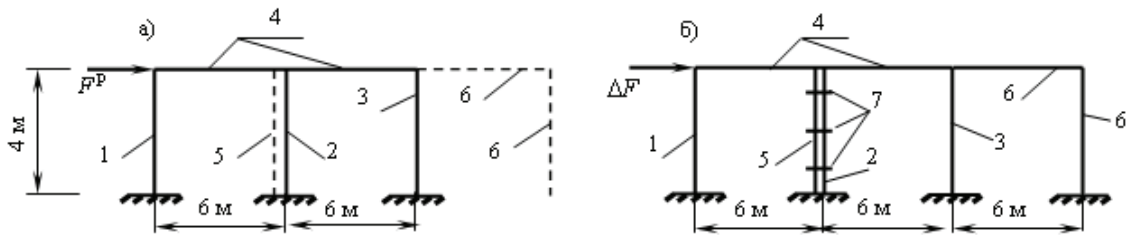


Рисунок 3. Расчетная схема рамы: а) до усиления; б) после усиления

Рассматривались два варианта последовательности выполнения усиления. В первом случае под действием ремонтных нагрузок F^P вначале выполняется усиление стойки 2 способом увеличения сечения. В этом случае сечение наращиваемой стойки увеличивается в два раза. Усиливающий элемент задаётся в виде отдельного стержня 5. Основной стержень второй стойки 2 и усиливающий элемент 5 присоединяют монтажными элементами 7 (рис. 3б). Затем вводятся дополнительные усиливающие стержни 6. При этом в основных элементах рамы (стержни 1, 2, 3, 4) действуют напряжения $\sigma^P + \sigma^M$. В элементе усиления 5 возникают только монтажные напряжения σ^M , а усиливающие дополнительные стержни 6 свободны от напряжений и будут участвовать в восприятии напряжений только от действия добавочных эксплуатационных нагрузок ΔF .

Во втором варианте сначала к основным элементам рамной конструкции, находящимся в напряженном состоянии, подсоединяют дополнительные стержни 6, а затем выполняют мероприятия по усилению стойки 2 способом увеличения сечения.

В последнем варианте дополнительные усиливающие стержни 6, в отличие от первого варианта, будут участвовать как в восприятии напряжений от монтажных сил σ^M , так и в восприятии напряжений от добавочных нагрузок ΔF . Усиление рамной конструкции осуществлялось при разных уровнях относительных ремонтных напряжений $\nu = \sigma^P / R$, где R – расчетное сопротивление материала. По результатам расчетов получены графики зависимости показателя эффективности усиления θ от уровня ремонтных напряжений ν (рис. 4). На рис. 4 график 1 соответствует случаю усиления по первому варианту, а график 2 получен при усилении рамы по второму варианту. Из сравнения этих графиков видно, что в первом варианте эффективность усиления выше. Поэтому при выборе вариантов последовательности выполнения усиления приоритет необходимо отдавать первому варианту.

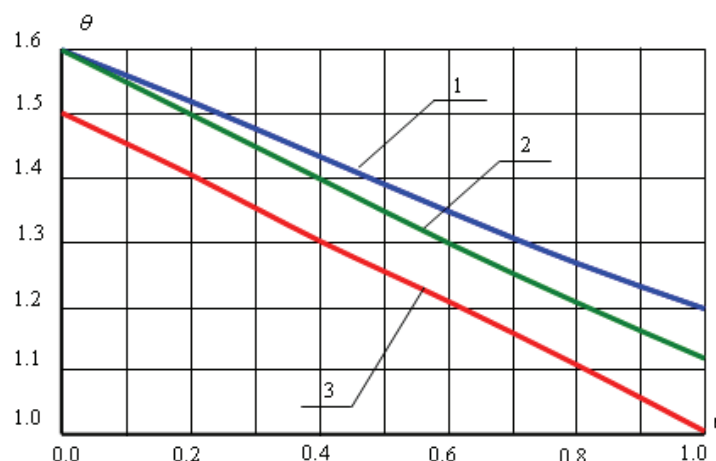


Рисунок 4. Графики зависимости $\theta = f(\nu)$

График 3 на рис. 4 получен для случая усиления рамы, когда в расчетах не учитывается влияние монтажных напряжений. Как видно из сравнения графиков 1 и 3, учет монтажных напряжений повышает эффективность усиления рамной конструкции. Это объясняется тем, что в рассмотренном примере учет монтажных сил позволяет учесть и разгрузку конструкции, которую они вызвали.

Выводы

1. Представленный вариационный метод расчета стержневой системы при усилении конструкции позволяет учитывать изменение размеров поперечного сечения стержней конструкции, наличие монтажных напряжений, наложение напряжений.
2. При проектировании усиления каждого конкретного эксплуатируемого сооружения следует рассматривать разные варианты последовательности этапов усиления.
3. Расчеты по определению напряженно-деформированного состояния усиливаемых нагруженных конструкций необходимо производить с учетом монтажных сил, возникающих при присоединении элементов усиления к основным элементам конструкции.

Литература

1. Будин А. Я., Чекренева М. В. Усиление портовых сооружений. М. : Транспорт, 1983. 178 с
2. Убайдуллоев М. Н., Серазутдинов М. Н. Оценка эффективности усиления нагруженных конструкций с учетом пластических деформаций // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 1. С. 106-111.
3. Убайдуллоев М.Н. Влияние пластических деформаций на несущую способность усиливаемых статически неопределимых конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. М. : РУДН, 2008. № 4. С. 28-33.
4. Убайдуллоев М. Н. Несущая способность усиливаемых конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2010. № 4. С. 106-111.
5. Бондаренко С. В., Санжаровский Р. С. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий. М. : Стройиздат, 1990. 352 с.
6. Ведяков И. И. Выявление резервов несущей способности стальных строительных конструкций на основе совершенствования методов их расчета и рационального применения современных материалов: Дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.23.01. М., 2000. 370 с.
7. Серазутдинов М. Н., Абрагим Х. А. Несущая способность стержневых элементов конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии // Вестник Казанского технол. ун-та. 2010. № 9. С. 512-518.
8. Серазутдинов М. Н., Убайдуллоев М. Н., Абрагим Х. А. Влияние монтажных сил на несущую способность усиливаемых стержневых систем // Вестник Казанского технол. ун-та. 2011. № 10. С. 116-124.
9. Кишиневская Е. В., Ватин Н. И., Кузнецов В. Д. Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3. С. 29-32.
10. Duarte M. V. Faria, Valter J. G. Lucio, A. Pinho Ramos. Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding // Engineering Structures. Volume 33, Issue 6. 2011. Pp. 2025–2043.
11. Yi Liu, Liam Gannon. Finite element study of steel beams reinforced while under load // Engineering Structures. Volume 31, Issue 11. 2009. Pp. 2630–2647.
12. Joakim Wallin, John Heander, Raid Karoum. Strengthening of a steel railway bridge and its impact on the dynamic response to passing trains // Engineering Structures. Volume 33, Issue 2. 2011. Pp. 635–646.
13. Ребров И. С. Усиление стержневых металлических конструкций. Л. : Стройиздат, 1988. 288 с.
14. Тимошенко С. П., Гере Дж. Механика материалов. М. : Мир, 1976. 672 с.
15. Серазутдинов М. Н., Хайруллин Ф. С. Метод расчета криволинейных стержней // Строительство и архитектура. 1991. № 5. С. 104-108.

**Маджид Насриевич Убайдуллоев, г. Казань, Россия*

Тел. моб.: +7(927)420-23-07; эл. почта: madgidpwn@rambler.ru

Strengthening of the beam structures taking into account repair and mounting forces influence

M.N. Serazutdinov

Kazan national research technological university, Kazan, Russia

M.N. Ubaydulloyev

Kazan national research technological university, Kazan, Russia

+7(927)420-23-07; e-mail: madgidpwn@rambler.ru

Key words

strengthening; repair stress; mounting stress; variational method

Abstract

In the article the variation method of calculation of the loaded statically indeterminable structures strengthened by increasing the section of elements and the constructive and design model of structures modifying by installation of additional elements is presented.

The procedure of the stress-strain state of the strengthened loaded structures determining, taking into account the repair and mounting stresses and also attached additional elements is presented.

Computer program, which is based on the described methodology and allows to simulate the strengthened structure and to determine its stress-strain state at various stages of considering the deformation and stress during the current action of strengthening is composed. Reliability and high accuracy of calculations made by this program are established by comparing them with the data of test examples and solution problems, which were obtained by other methods.

References

1. Budin A. Ya., Chekreneva M. V. *Usileniye portovykh sooruzheniy* [Strengthening of port structures]. Moscow: Transport, 1983. 178 p. (rus)
2. Ubaydulloyev M. N., Serazutdinov M. N. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo* [News of higher educational institutions. Construction]. 2009. No. 1. Pp. 106-111. (rus)
3. Ubaydulloyev M. N. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy* [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2008. No. 4. Pp. 28-33. (rus)
4. Ubaydulloyev M. N. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura* [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]. 2010. No. 4. Pp. 106-111. (rus)
5. Bondarenko S. V., Sanzharovskiy R. S. *Usileniye zhelezobetonnykh konstruksiy pri rekonstruksiy zdaniy* [Strengthening of reinforced concrete structures during the buildings reconstruction]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 352 p. (rus)
6. Vedyakov I. I. *Vyyavleniye rezervov nesushchey sposobnosti stalnykh stroitelnykh konstruksiy na osnove sovershenstvovaniya metodov ikh rascheta i ratsionalnogo primeneniya sovremennykh materialov: Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni d.t.n* [Identifying reserves of bearing capacity of steel building structures on the basis of improving their methods of calculating and rational use of modern materials: Thesis for the degree]. Moscow: 2000. 370 p. (rus)
7. Serazutdinov M. N., Abragim Kh. A. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2010. No. 9. Pp. 512-518. (rus)
8. Serazutdinov M. N., Ubaydulloyev M. N. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2011. No. 10. Pp. 116-124. (rus)
9. Kishinevskaya Ye. V., Vatin N. I., Kuznetsov V. D. *Magazine of civil engineering*. 2009. No. 3. Pp. 29-32. (rus)
10. Duarte M. V. Faria, Valter J. G. Lucio, A. Pinho Ramos. Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding. *Engineering Structures*. 2011. Volume 33, Issue 6. Pp. 2025 – 2043.
11. Yi Liu, Liam Gannon. Finite element study of steel beams reinforced while under load. *Engineering Structures*. 2009. Volume 31, Issue 11. Pp. 2630 – 2647.

12. Joakim Wallin, John heander, Raid Karoum. Strengthening of a steel railway bridge and its impact on the dynamic response to passing trains. *Engineering Structures*. 2011. Volume 33, Issue 2. Pp. 635–646.
13. Rebrov I. S. *Usileniye sterzhnevyykh metallicheskiykh konstruktsiy*. [Strengthening of beam metal structures]. Leningrad: Stroyizdat, 1988. 288 p. (rus)
14. Timoshenko S. P., Gere DZh. *Mekhanika materialov* [Mechanics of materials]. Moscow: Mir, 1976. 672 p. (rus)
15. Serazutdinov M. N., Khayrullin F. S. *Stroitelstvo i arkhitektura* [Building and architecture]. 1991. No. 5. Pp. 104-108. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 98-105