



УДК 624.04

**Серазутдинов М.Н.** – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: [serazmn@mail.ru](mailto:serazmn@mail.ru)

**Убайдуллоев М.Н.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [madgidpwn@rambler.ru](mailto:madgidpwn@rambler.ru)

**Абрагим Х.А.** – аспирант

E-mail: [jussainaziz@yahoo.com](mailto:jussainaziz@yahoo.com)

**Казанский национальный исследовательский технологический университет**

Адрес организации: 420015, Казань, ул. К. Маркса, 68

### Определение несущей способности усиливаемых нагруженных конструкций с учетом монтажных напряжений

#### Аннотация

В статье описывается вариационный метод расчета напряженно-деформированного состояния стержневых конструкций, усиливаемых без вывода из эксплуатации. Излагается методика определения напряженно-деформированного состояния усиливаемых нагруженных конструкций с учетом ремонтных и монтажных напряжений. Представлены результаты расчетов, иллюстрирующие особенности напряженно-деформированного состояния рамной конструкции с учетом напряжений и деформаций, возникающих в ней на различных этапах усиления.

**Ключевые слова:** стержневые конструкции, усиление, ремонтные напряжения, монтажные напряжения, вариационный метод.

Как известно [1], процесс усиления может оказать существенное влияние на работу конструкций, усиливаемых под нагрузкой. При определении несущей способности усиливаемой конструкции следует учитывать ее исходное напряженно-деформированное состояние, а также дополнительные напряжения, возникающие при монтаже и при дополнительном нагружении [1, 2]. Часть из этих факторов учитываются, например, при расчетах с использованием методики, описанной в работах [3, 4].

Влияние монтажных напряжений на напряженно-деформированное состояние усиливаемых нагруженных конструкций рассмотрено в монографии [1]. Но, как отмечается признанным ученым в области расчета усиленных конструкций И.С. Ребровым в его фундаментальной монографии [1], изложенные в нем методики по расчету усиленных стержневых систем можно рассматривать лишь как первое приближение, нуждающееся в дополнительной проверке с помощью численных методов расчета.

В статье рассмотрен способ усиления стержневой конструкции, при использовании которого к нуждающемуся в усилении деформированному стержневому элементу присоединяется прямолинейный усиливающий стержень (рис. 1 а). Для обеспечения прилегания элементы усиления предварительно должны быть прижаты к деформированному основному стержню 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, а основной стержень получает обратный выгиб. При этом от воздействия сил  $F_j^M$  в конструкции возникают дополнительные (монтажные) напряжения.

Получается, что для расчета напряженно-деформированного состояния конструкции нужно рассчитать его напряженное состояние с учетом наличия в некоторой области начальных (ремонтных) напряжений, присоединения дополнительных элементов, возникновения монтажных напряжений.

Следовательно, в этом случае для определения напряженно-деформированного состояния усиленного сооружения нужно создать расчетную схему, которая позволяла бы последовательно определять напряжения и деформации в конструкции от воздействия ремонтных, монтажных и эксплуатационных нагрузок. При этом величины монтажных

сил заранее не известны, они зависят от выбранного способа монтажа и жесткостных характеристик системы. Их нужно определять, используя специально разработанную модель усиления деформируемой стержневой системы.

При решении задачи полагаем, что в усиливаемой конструкции возникают только упругие деформации.

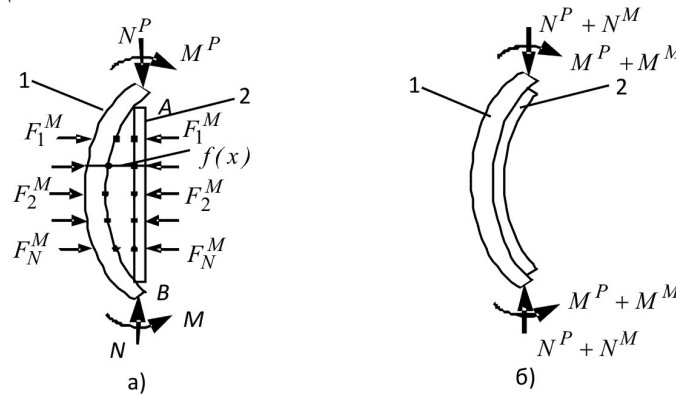


Рис. 1. Расчетная схема к определению монтажных сил

Расчет напряженно-деформированного состояния усиливаемой конструкции состоит из следующих этапов:

1. Определяется напряженно-деформированное состояние (ремонтные напряжения и деформации) исходной упругой стержневой системы при действии ремонтных нагрузок.
2. С учетом наличия ремонтных сил напряжений и деформаций вычисляются монтажные силы.
3. Находятся величины монтажных напряжений с учетом действия ремонтных нагрузок и монтажных сил.
4. В расчетную схему вводятся дополнительные стержневые элементы, моделирующие реальное соединение прижатых друг к другу стержней на болтах.
5. Определяется напряженно-деформированное состояние 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, обусловленных различными факторами, в том числе и технологическими.

Принимались основные допущения и соотношения теории стержней с учетом сдвигов [5]. Рассматривались такие стержневые системы и виды деформаций стержня, для которых деформацию сечения можно не учитывать.

Возникающие в системе перемещения деформации и напряжения при действии ремонтных нагрузок находятся из условия:

$$dU - dW = 0, \tag{1}$$

где  $dU$  – вариация потенциальной энергии деформации стержневой системы;  $dW$  – 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  $\tilde{u} = \{\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3\}^T$  и вектор углов поворота поперечных сечений  $\tilde{J} = \{\tilde{J}_1, \tilde{J}_2, \tilde{J}_3\}^T$ . Компоненты этих векторов определены в системе координат  $0\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$ .

На первом этапе расчетов, при определении напряженно-деформированного состояния исходной упругой стержневой системы, в случае действия ремонтных нагрузок полагается:

$$dU = \int_{l_C} \iint_{A^P} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl$$

$$dW = \int_{l_q} (\tilde{q}_1^p d\tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^p d\tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^p d\tilde{u}_3) dl + \sum_n (\tilde{F}_{1n}^p d\tilde{u}_1(x_n) + \tilde{F}_{2n}^p d\tilde{u}_2(x_n) + \tilde{F}_{3n}^p d\tilde{u}_3(x_n)) + \sum_k (\tilde{M}_{1k}^p \tilde{J}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^p \tilde{J}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^p \tilde{J}_{3k}(x_k)), \quad (2)$$

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  $\tilde{J}_1, \tilde{J}_2, \tilde{J}_3$  и деформации вычисляются в локальной ортогональной системе координат  $Oxyz$ , с осью  $Ox$ , направленной по касательной к продольной оси стержня [6].

Полагаем, что в поперечных сечениях стержней возникают деформации:

$$e_x = \frac{du_1}{dx} - y \frac{dj_3}{dx} + z \frac{dj_2}{dx}, \quad g_{xy} = f_1(y, z) \left[ \frac{du_2}{dx} - j_3 \right] - f_2(y, z) \frac{dj_1}{dx},$$

$$g_{xz} = f_1^*(y, z) \left[ \frac{du_2}{dx} + j_2 \right] + f_2^*(y, z) \frac{dj_1}{dx},$$

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  $Oxyz$ .

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.

Так, например, для стержня с поперечным сечением в виде прямоугольника со сторонами  $h$  и  $b$   $\left(-\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}\right)$  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  $\tilde{J}$  представляются в следующем виде:

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

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:

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

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

Удовлетворяя кинематическим граничным условиям, условиям стыковки перемещений  $u$  и углов поворота  $j$  на границах участков стержней, 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  $C_{km}^i, D_{km}^i$ .

Для вычисления интегралов, которые содержатся в условии (1), проводится численное интегрирование по формуле Гаусса. Интегрирование проводится по длине стержней и по площади их поперечных сечений.

С использованием выражений (2) и (3) определяются перемещения стержней, затем подсчитываются деформации  $e_x, g_{xy}, g_{xz}$  и напряжения  $s_x^p, t_{xy}^p, t_{xz}^p$ , 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 в).

Обозначим через  $f_i$  – расстояния между точками в паре с номером  $i$  ( $i=1,2,\dots,N_T$ ),  $\Delta w_{ij}^1$  – 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:

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

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  $AB$  (рис. 1в), определяются по формуле (6). Величины  $F_j^M$  должны быть такие, чтобы выполнялись условия (7).

Для нахождения  $F_j^M$ , после подставки выражения  $w_i$  в виде (6) в равенство (7), получится система алгебраических уравнений:

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

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

Изменение расстояний между точками  $\Delta w_{ij}^1$ , в паре с номером  $i$ , при действии единичных сил  $\tilde{F}_j^M = 1$  ( $j=1,2,\dots,N_F$ ), находится также вариационным методом из условия (1).

При этом используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} dU = & \int_{l_C} \iint_{A^p} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl + \int_{l_{V_{CM}}} \iint_{A^{V_{CM}}} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl + \\ & + \int_{l_C} \iint_{A^p} (s_x^p de_x + t_{xy}^p dg_{xy} + t_{xz}^p dg_{xz}), \quad (9) \\ dW = & \int_{l_C} (k_x \tilde{F}_j^M du_1(x_j) + k_y \tilde{F}_j^M du_2(x_j) + k_z \tilde{F}_j^M du_3(x_j)), \end{aligned}$$

где  $j=1,2,\dots,N_F$ ;  $l_{V_{CM}}$ ,  $A^{V_{CM}}$  – длина и площадь поперечных сечений усиливающих стержней, при подсоединении которых возникают монтажные напряжения;  $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$  – коэффициенты, принимающие значения 0 или 1.

Для вычисления всех  $\Delta w_{ij}^1$  нужно решить  $3N_F$  задач, задавая в исходных данных (в выражении (9)) для каждой силы  $\tilde{F}_j^M = 1$ , приложенной в точке с координатой  $x_j$ , последовательно значения  $\kappa_x = 1, \kappa_y = 0, \kappa_z = 0$ ;  $\kappa_x = 0, \kappa_y = 1, \kappa_z = 0$ ;  $\kappa_x = 0, \kappa_y = 0, \kappa_z = 1$ . В результате определяются в локальной системе координат перемещения  $\Delta u_{1ij}^1, \Delta u_{2ij}^1, \Delta u_{3ij}^1$  от

единичной силы  $\tilde{F}_j^M = 1$ , приложенной в точке с координатой  $x_j$  в направлениях осей координат  $\tilde{O}\tilde{x}$ ,  $\tilde{O}\tilde{y}$ ,  $\tilde{O}\tilde{z}$ , соответственно. Затем вычисляются значения  $\Delta w_{ij}^1$ .

После этого, решая систему алгебраических уравнений (8), находят величины монтажных сил  $\tilde{F}_j^M$ .

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

$$dU = \int_{l_C} \iint_{A^p} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl + \int_{l_{YCM}} \iint_{A^{YCM}} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl +$$

$$+ \int_{l_C} \iint_{A^p} (s_x^p de_x + t_{xy}^p dg_{xy} + t_{xz}^p dg_{xz}) dA dl,$$

$$dW = \int_{l_q} (\tilde{q}_1^p d\tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^p d\tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^p d\tilde{u}_3) dl + \sum_n (\tilde{F}_{1n}^p d\tilde{u}_1(x_n) + \tilde{F}_{2n}^p d\tilde{u}_2(x_n) + \tilde{F}_{3n}^p d\tilde{u}_3(x_n)) +$$

$$+ \sum_k (\tilde{M}_{1k}^p \tilde{J}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^p \tilde{J}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^p \tilde{J}_{3k}(x_k)) + \sum_j^{N_F} (\tilde{F}_j^M d\tilde{u}_1(x_j) + \tilde{F}_j^M d\tilde{u}_2(x_j) + \tilde{F}_j^M d\tilde{u}_3(x_j)).$$

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.

Напряженно-деформированное состояние конструкции после усиления определяется с учетом действия эксплуатационных нагрузок, наличия ремонтных  $s_x^p, t_{xy}^p, t_{xz}^p$  и монтажных  $s_x^M, t_{xy}^M, t_{xz}^M$  напряжений. Также следует учитывать, что вводятся дополнительные стержневые элементы, моделирующие соединение прижатых друг к другу стержней болтами.

В случаях, когда в стержнях возникают только упругие деформации, используются следующие соотношения  $dU, dW$ :

$$dU = \int_{l_C} \iint_{A^p} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl + \int_{l_{YCM}} \iint_{A^{YCM}} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl +$$

$$+ \int_{l_B} \iint_{A^B} (s_x de_x + t_y dg_{xy} + t_z dg_{xz}) dA dl + \int_{l_{CA^p}} \iint_{A^p} ((s_x^p + s_x^M) de_x + (t_{xy}^p + t_{xy}^M) dg_{xy} + (t_{xz}^p + t_{xz}^M) dg_{xz}) dA dl +$$

$$+ \int_{l_{YCM}} \iint_{A^{YCM}} (s_x^M de_x + t_{xy}^M dg_{xy} + t_{xz}^M dg_{xz}) dA dl.$$

$$dW = \int_{l_q} (\tilde{q}_1^y d\tilde{u}_1 + \tilde{q}_2^y d\tilde{u}_2 + \tilde{q}_3^y d\tilde{u}_3) dl + \sum_i (\tilde{F}_{1i}^y d\tilde{u}_1(x_i) + \tilde{F}_{2i}^y d\tilde{u}_2(x_i) + \tilde{F}_{3i}^y d\tilde{u}_3(x_i)) +$$

$$+ \sum_k (\tilde{M}_{1k}^y \tilde{J}_{1k}(x_k) + \tilde{M}_{2k}^y \tilde{J}_{2k}(x_k) + \tilde{M}_{3k}^y \tilde{J}_{3k}(x_k)).$$

Здесь  $l_B, A^B$  – длина и площадь поперечных сечений стержневых элементов, моделирующих соединение прижатых друг к другу стержней болтами. 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 относительно осей координат  $\tilde{M}_{1k}^y, \tilde{M}_{2k}^y, \tilde{M}_{3k}^y$  вычисляются по формулам:

$$\tilde{q}_1^y = \tilde{q}_1^p + \Delta\tilde{q}_1, \quad \tilde{q}_2^y = \tilde{q}_2^p + \Delta\tilde{q}_2, \quad \tilde{q}_3^y = \tilde{q}_3^p + \Delta\tilde{q}_3;$$

$$\tilde{F}_{1i}^y = \tilde{F}_{1i}^p + \Delta\tilde{F}_{1i}, \quad \tilde{F}_{2i}^y = \tilde{F}_{2i}^p + \Delta\tilde{F}_{2i}, \quad \tilde{F}_{3i}^y = \tilde{F}_{3i}^p + \Delta\tilde{F}_{3i};$$

$$\tilde{M}_{1k}^y = \tilde{M}_{1k}^p + \Delta\tilde{M}_{1k}, \quad \tilde{M}_{2k1k}^y = \tilde{M}_{2k}^p + \Delta\tilde{M}_{2k}, \quad \tilde{M}_{3k}^y = \tilde{M}_{3k}^p + \Delta\tilde{M}_{3k},$$

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.

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 по этой программе установлены на основе сравнения полученных результатов с данными решения тестовых примеров и задач, которые получены другими методами.

Рассмотрим пример усиления рамной конструкции, приведенной на рис. 2а, способом увеличения сечения левой стойки. При усилении сечение балки увеличивается в два раза. Усиливающий элемент задается в виде отдельного стержня 2. Сечение элементов рамы 1 и усиливающего элемента 2 – двутавр № 22 (рис. 3а). Основной стержень левой стойки 1 и усиливающий элемент 2 присоединяют монтажными элементами 3. Эпюра изгибающих моментов в рамной конструкции от воздействия ремонтной нагрузки  $F^p = 10 \text{ кН}$  приведена на рис. 2а.

В рассматриваемом примере значения монтажных сил в сближаемых точках по результатам расчетов получились следующими:  $F_1^m = 1.471 \text{ кН}$ ,  $F_2^m = 4.34 \text{ кН}$ ,  $F_3^m = 0.135 \text{ кН}$  (рис. 2 б). Эпюра изгибающих моментов от воздействия ремонтной нагрузки  $F^p$  и монтажных сил  $F_1^m, F_2^m, F_3^m$  в раме приведена на рис. 2б. Затем на конструкцию прикладывается дополнительная эксплуатационная нагрузка  $\Delta F^y = 20 \text{ кН}$  (рис. 2 в) и в результате суммарная сосредоточенная сила, действующая после усиления, становится равной  $F^y = 30 \text{ кН}$ . При этом элемент усиления 2 и основной стержень 1 деформируются взаимосогласованно ввиду соединения элементами 3, эпюра изгибающих моментов после усиления приведена на рис. 2 в.

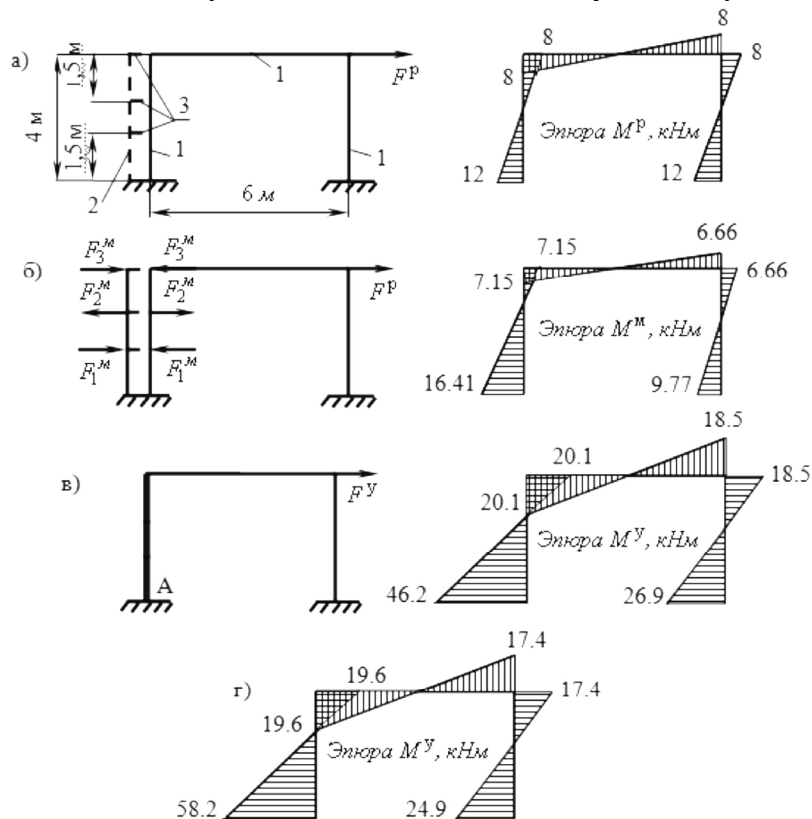


Рис. 2. а) Расчетная схема рамы и эпюра изгибающих моментов в период усиления; б) То же, при действии монтажных сил; в) То же, после усиления; г) Эпюра изгибающих моментов, полученная без учета монтажных сил

Как показывают результаты расчетов, в рассматриваемом случае учет монтажных деформаций и напряжений существенно влияет на распределение изгибающих моментов и напряжений по стержням. Если сравнивать значения усилий в усиливаемой раме, полученные при расчете с учетом монтажных сил (рис. 2в), со значениями усилий в такой же раме, рассчитанной без учета монтажных сил (рис. 2г), то видно, что в первом случае максимальный изгибающий момент в раме на 21 % меньше, чем во втором. На рис. 3 также приведены эпюры распределения нормальных напряжений в лимитирующем опорном сечении А рамы, полученные с учетом (рис. 3б) и без учета (рис. 3в) монтажных напряжений. Как видно из этих эпюр, они качественно отличаются друг от друга. При этом максимальное сжимающее напряжение в сечении рамы, полученное с учетом монтажных сил, на 8,3 % меньше, по сравнению со случаем, когда расчет производится без учета них, а максимальное растягивающее напряжение меньше на 33 %.

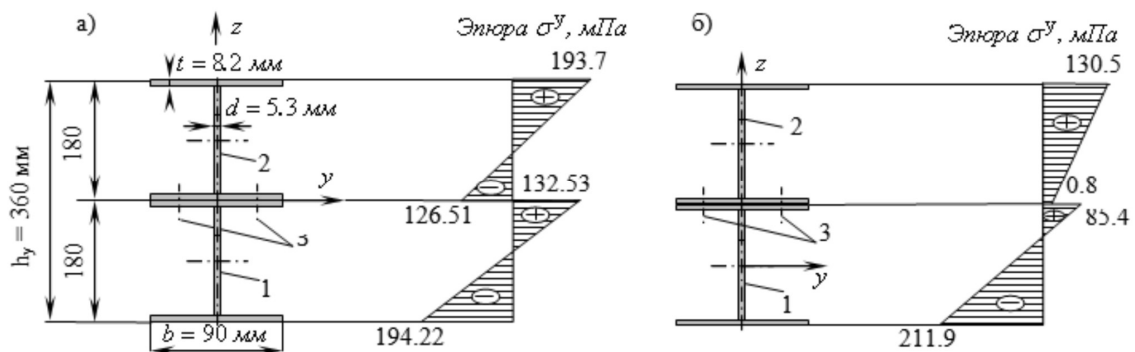


Рис. 3. а) Сечение стойки рамы после усиления: 1 – основной элемент конструкции; 2 – усиливающий элемент; 3 – соединительные элементы; б) Эпюра напряжений  $\sigma^y$  в лимитирующем сечении рамы (опорное сечение А) с учетом монтажных напряжений; в) То же, полученное без учета монтажных сил

### Список литературы

1. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций. – Л.: Стройиздат, 1988. – 288 с.
2. Будин А.Я., Чекренева М.В. Усиление портовых сооружений. – М.: Транспорт, 1983. – 178 с.
3. Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н., Абрагим Х.А. Расчет усиливаемых конструкций вариационным методом // Известия вузов. Строительство, 2010, № 7. – С. 118-124.
4. Серазутдинов М.Н., Абрагим Х.А. Несущая способность стержневых элементов конструкций, усиливаемых в напряженном состоянии // Вестник Казан. гос. технол. ун-та, 2010, № 9. – С. 512-518.
5. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов /. – Мир, 1976. – 672 с.
6. Серазутдинов М.Н., Хайруллин Ф.С. Метод расчета криволинейных стержней. // Строительство и архитектура, 1991, № 5. – С. 104-108.

**Serazutdinov M.N.** – doctor of physical and mathematical sciences, professor

E-mail: [serazmn@mail.ru](mailto:serazmn@mail.ru)

**Ubaidulloyev M.N.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [madgidpwn@rambler.ru](mailto:madgidpwn@rambler.ru)

**Abraham H.A.** – post-graduate student

E-mail: [jussainaziz@yahoo.com](mailto:jussainaziz@yahoo.com)

**Kazan National Research Technological University**

The organization address: 420015, Kazan, Karl Marx st., 68

## **Determination of bearing capacity of the strengthened loaded structures taking into account mounting stress**

### **Resume**

In the article the variation method is presented to calculate the stress-strain state of structures strengthening without withdrawal from the exploitation. This method allows to take into account features such as a change in cross-sectional dimensions of the beam and the additional consequential loading on construction, the imposition of the stress caused by various factors, including technological.

At the problem solution, it is assumed that in the strengthened structures occur only elastic deformations.

Calculation of stress-strain state of strengthened structure consists of the following stages:

– Determine the stress-strain state (repair stress and deformation) of the initial elastic beam system under the action of repair loadings.

– Taking into account the repair forces availability of stresses and deformations, mounting forces are calculated.

– Finding of mounting stress values taking into account action of repair loadings and mounting forces.

– In the design scheme introduces additional beam elements, modeling real connection are pressed together beams by bolts.

– Determine the stress-strain state of the structure, after strengthening, at the action of operational loadings, taking into account the repair and mounting stresses, attach additional elements.

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

**Keywords:** beams structures, strengthening, repair stress, assembly stress, variation method.

### **References**

1. Rebrov I.S. Strengthening of beam metal structures. – L.: Stroiizdat, 1988. – 288 p.
2. Budin A.Y., Chekreneva M.V. Strengthening of port structures. – M.: Transport, 1983. – 178 p.
3. Serazutdinov M.N., Ubaydulloyev M.N., Abraham H.A. Calculation reinforced of loaded structures by variation method // *Izv. universities. Building*, 2010, № 7. – P. 118-124.
4. Serazutdinov M.N., Abraham H.A. Bearing capacity of beam elements structures, strengthening under stress state // *Herald of Kazan State Technological University*, 2010. № 9. – P. 512-518.
5. Timoshenko S.P., Gere DJ. *Mechanics of materials*. – Mir, 1976. – 672 p.
6. Serazutdinov M.N., Khairullin F.S. Method of calculation of curved beams. // *Construction and Architecture*, 1991, № 5. – P. 104-108.