

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА АРМАТУРЫ ФАП
В ИЗГИБАЕМОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОМ ЭЛЕМЕНТЕ
ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ С ДВОЙНЫМ
АРМИРОВАНИЕМ**

УДК 624.012

Попов Владимир Мирович

*Доцент кафедры строительных конструкций
ФГОУ ВПО "Костромская государственная сельскохозяйственная
академия", пос. Караваево, Костромская область,
кандидат технических наук*

Вопросы расчета железобетонных элементов, усиленных фиброармированными пластиками (далее ФАП), изложены в [1,2,5].

В настоящей работе рассмотрена методика расчета требуемой площади сечения арматуры из фиброармированного пластика (ФАП) в рамках метода расчета по предельным состояниям. Под ФАП будем понимать материалы на основе углеродных, стеклянных, арамидных и базальтовых волокон в виде холстов, ламелей или стержней.

Основные допущения расчета изгибаемых железобетонных конструкций по методу предельных состояний:

- прочность бетона растянутой зоны сечения принимается равной нулю;
- бетон в сжатой зоне представляет собой жесткопластический материал с расчетным сопротивлением, равным призменной прочности R_b , поэтому в предельном состоянии напряжения в бетоне равномерно распределены по высоте расчетной сжатой зоны;
- растягивающие напряжения в стальной арматуре принимают не более расчетного сопротивления растяжению R_s ;
- растягивающие напряжения в арматуре из ФАП принимают не более расчетного сопротивления растяжению R_f ;
- справедлива гипотеза плоских сечений (используется для вывода формул для вычисления граничных значений относительной высоты сжатой зоны бетона по h_0 и h и определения напряжений в стальной арматуре и ФАП);
- внешняя арматура и бетон сохраняют полное сцепление и работают совместно до наступления предельного состояния;
- деформации сдвига в клеевом слое не учитываются.

Расчет по прочности нормальным сечениям изгибаемых элементов предполагает рассмотрение нескольких видов предельных состояний. В общем случае возможны следующие типы разрушения усиленных элементов [2]:

- а) разрушение сжатой зоны бетона до достижения напряжений текучести в стержневой растянутой арматуре; напряжения в ФАП значительно ниже расчетных (переармированная растянутая зона);

- б) наступление текучести в растянутой стержневой арматуре и последующий разрыв внешней арматуры ФАП без разрушения сжатой зоны бетона;
- в) наступление текучести в растянутой стержневой арматуре и последующее разрушение внешней арматуры ФАП и сжатой зоны;
- г) разрушения от отслоения элементов ФАП.

Изгибаемые элементы рекомендуется [2] проектировать на случаи разрушения «б» и «в», так как разрушение по первому типу связано с недоиспользованием механических свойств стержневой и внешней арматурой.

Для предотвращения отслаивания ФАП (случай «г») необходимо, чтобы деформация в нём могла быть воспринята основанием, для чего нужно ограничить уровень его деформаций с помощью коэффициента условия работы ФАП k_m [2].

Коэффициент k_m , с одной стороны, обеспечивает отсутствие отслоения ФАП при расчетных нагрузках, а с другой – повышает надежность усиливаемой конструкции, поскольку ФАП работает упруго и не имеет запаса по деформациям.

Допустимые предельные расчетные деформации ФАП определяются [2]:

$$\varepsilon_{fu} \leq k_m \varepsilon_{fi}.$$

Допустимый уровень напряжений в ФАП не может быть больше расчетного, определенного по закону Гука:

$$\sigma_f \leq R_f = E_f \varepsilon_{fu}.$$

Рассмотрим методику расчета на основе условий равновесия усилий в предельном состоянии, как в соответствии с положением норм [3], так и [4].

Для железобетонного изгибаемого элемента прямоугольного сечения с двойным армированием стальной арматурой и ФАП в растянутой зоне несущая способность относительно центра тяжести сечения сжатой зоны бетона:

$$M_u = \sigma_s A_s (h_0 - 0,5x) + \sigma_f A_f (h - 0,5x) + R_{sc} A'_s (0,5x - a').$$

Уравнение равновесия продольных усилий:

$$R_b bx + R_{sc} A'_s - \sigma_s A_s - \sigma_f A_f = 0,$$

$$\sigma_s \leq R_s, \quad \sigma_f \leq R_f,$$

где M_u – несущая способность изгибаемого элемента, усиленного ФАП;

σ_s, σ_f – напряжения в стальной и ФАП арматуре;

R_s – расчетное сопротивление стальной арматуры растяжению;

R_{sc} – расчетное сопротивление стальной арматуры сжатию;

R_f – расчетное сопротивление арматуры ФАП растяжению;

A_s – площадь поперечного сечения стальной растянутой арматуры;

A'_s – площадь поперечного сечения стальной сжатой арматуры;

A_f – площадь поперечного сечения растянутой арматуры ФАП;

b – ширина поперечного сечения изгибаемого элемента;

h – высота поперечного сечения изгибаемого элемента;

a – расстояние от центра тяжести стальной растянутой арматуры до растянутой грани элемента;

$h_0 = h - a$ – рабочая высота сечения (расстояние от центра тяжести стальной растянутой арматуры до сжатой грани элемента);

a' – расстояние от центра тяжести стальной сжатой арматуры до сжатой грани элемента;

x – расчетная высота сжатой зоны бетона.

Относительная высота сжатой зоны бетона

$$\xi = \frac{x}{h_0}.$$

Относительная (от h) высота сжатой зоны бетона

$$\xi_f = \frac{x}{h} = \frac{x}{h} \cdot \frac{h_0}{h_0} = \xi \frac{h_0}{h}.$$

Рассмотрим работу изгибаемого железобетонного элемента до усиления. Предположим, что бетон сжатой зоны работает упруго.

Высоту сжатой зоны бетона в этом случае найдем из уравнения статического момента сечения, приведенного к бетону, относительно нейтральной оси:

$$0,5bx^2 + (\alpha - 1)A'_s(x - a') - \alpha A_s(h_0 - x) = 0,$$

где $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$.

Преобразуем данное уравнение и представим в виде:

$$0,5bx^2 + [(\alpha - 1)A'_s + \alpha A_s]x - [(\alpha - 1)A'_sa' + \alpha A_sh_0] = 0.$$

Представим последнее уравнение в виде:

$$Ax^2 + Bx + C = 0,$$

где $A = 0,5b$;

$$B = [(\alpha - 1)A'_s + \alpha A_s];$$

$$C = -[(\alpha - 1)A'_sa' + \alpha A_sh_0].$$

Решая это уравнение, найдем высоту сжатой зоны бетона:

$$x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}.$$

Момент инерции сечения, приведенного к бетону относительно нейтральной оси:

$$I_1 = \frac{bx^3}{3} + (\alpha - 1)A'_s(x - a')^2 + \alpha A_s(h_0 - x)^2.$$

Начальная деформация крайней сжатой фибры бетона до усиления:

$$\varepsilon'_b = \frac{Mx}{I_1 E_b} \leq \varepsilon = 0,0015.$$

Начальная деформация крайней растянутой фибры бетона до усиления:

$$\varepsilon_{bl,нач} = \frac{M(h-x)}{I_1 E_b} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{bl,нач} = \frac{\varepsilon'_b(h-x)}{x}.$$

Уравнение равновесия продольных усилий в элементе:

$$\sigma_f A_f = R_b bx + R_{sc} A'_s - R_s A_s.$$

Представим последнее уравнение в виде:

$$\sigma_f A_f = R_b bh \xi_f + R_{sc} A'_s - R_s A_s.$$

где $\xi_f = \frac{x}{h}$.

Условие прочности относительно растянутой грани элемента:

$$M \leq R_b bx(h - 0,5x) + R_{sc} A'_s(h - a') - R_s A_s a$$

или

$$M \leq R_b bh^2 \xi_f (1 - 0,5 \xi_f) + R_{sc} A'_s (h - a') - R_s A_s a.$$

Это уравнение перепишем в виде:

$$M \leq R_b bh^2 \alpha_{mf} + R_{sc} A'_s (h - a') - R_s A_s a,$$

где $\alpha_{mf} = \xi_f (1 - 0,5 \xi_f)$.

Приравняв несущую способность элемента к моменту от нагрузки, найдем параметр

$$\alpha_{mf} = \frac{M - R_{sc} A'_s (h - a') + R_s A_s a}{R_b bh^2}.$$

Относительная высота (относительно h) сжатой зоны бетона

$$\xi_f = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_{mf}}.$$

При этом должны выполняться условия:

$$\xi_f = \frac{x}{h} \leq \xi_{Rf}, \quad \xi = \frac{x}{h_0} = \xi_f \frac{h}{h_0} \leq \xi_R,$$

где ξ_R – граничная относительная высота сжатой зоны бетона (по h_0);

ξ_{Rf} – граничная относительная высота сжатой зоны бетона (по h).

Граничная относительная высота сжатой зоны бетона по h_0 находится:

– по СНиП 2.03.01.-84*

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{bu}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)},$$

где $\omega = 0,85 - 0,008 \cdot R_b$ – характеристика сжатой зоны бетона;

$\varepsilon_{bu} = 0,002$ – предельные деформации бетона при центральном сжатии;

$\varepsilon_{s,el}$ – деформации стальной арматуры, соответствующие R_s ;

– по СП 52-101-2003

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \varepsilon_{s,el} / \varepsilon_{b,ult}},$$

где $\varepsilon_{b,ult} = 0,0035$ – предельные деформации бетона на сжатие при изгибе.

Граничная относительная высота сжатой зоны бетона по h находится:

– СНиП 2.03.01.-84*

$$\xi_{Rf} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{bu}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)}; \tag{1}$$

– СП 52-101-2003

$$\xi_{Rf} = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{b,ult}}}; \tag{2}$$

где $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ без учета начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой;

$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} + \varepsilon_{br,нач}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ с учетом начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой;

$\varepsilon_f = \varepsilon_{f_u} - \varepsilon_{fp}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях

$\sigma_f = R_f$ с учетом деформаций предварительного напряжения арматуры ФАП и без учета начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой;

$\varepsilon_f = \varepsilon_{f_u} + \varepsilon_{bt,нач} - \varepsilon_{fp}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ с учетом начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой и деформаций предварительного напряжения арматуры ФАП.

Значения ζ_{Rf} (границной относительной высоты сжатой зоны бетона по h) при усилении конструкции без разгрузки будут зависеть от величины начальных деформаций крайней растянутой фибры бетона до усиления. На рис. 1 приведены графики зависимостей ζ_{Rf} от начальных деформаций крайней растянутой фибры бетона для СП 52-101-2003 и СНиП 2.03.01-84*. Значения ζ_{Rf} , вычисленные по (2), не зависят от класса бетона, тогда как результаты, полученные по (1), при классе В15 в 1,84 раза больше, чем для класса В60.

Предварительное напряжение ФАП повышает значение ζ_{Rf} (границной относительной высоты сжатой зоны бетона по h). На графиках (рис.2) показано, как меняется величина ζ_{Rf} при различных деформациях предварительного напряжения. Максимальная величина деформаций предварительного напряжения соответствует $\sigma_{fp} = 0,5R_f$. При классе бетона В60 значение ζ_{Rf} увеличилось в 1,5 раза, при классе В15 – в 1,38 раза.

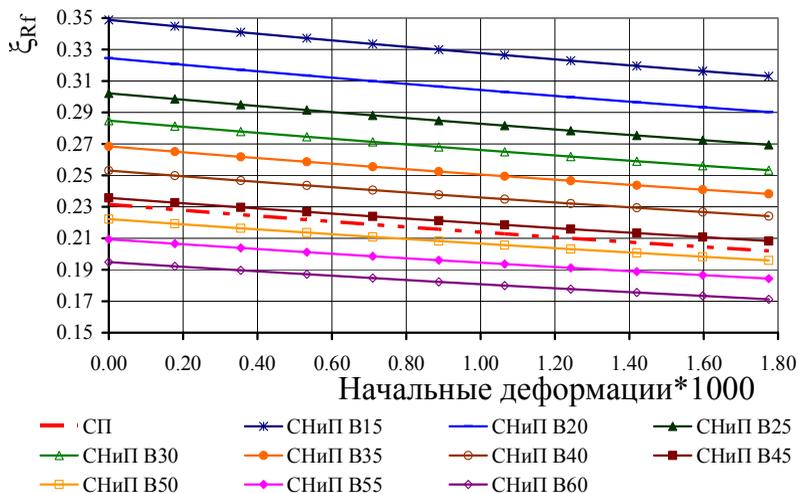


Рис. 1. Зависимость граничной относительной высоты сжатой зоны бетона (по h) от величины начальных деформаций

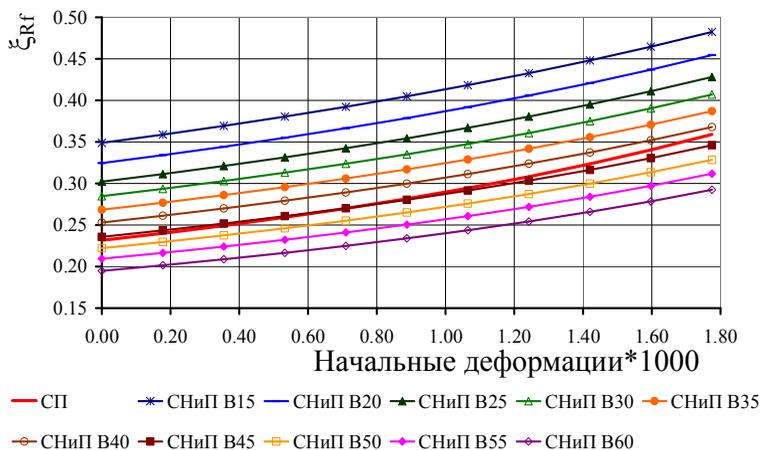


Рис.2. Зависимость граничной относительной высоты сжатой зоны бетона (по h) от величины деформаций предварительного напряжения

Учитывая значительные деформации ФАП и относительно небольшой модуль упругости (по отношению к прочности), предварительное напряжение позволяет эффективно включиться ФАП в работу при усилении под нагрузкой. При расчете ξ_{Rf} по нормам [4] ее величина не зависит от класса бетона.

Требуемая площадь сечения арматуры ФАП

$$A_{f,mp} = \frac{R_b b h \xi_f + R_{sc} A'_s - R_s A_s}{\sigma_f},$$

где напряжения в арматуре ФАП будут определяться как функция от ξ_f по [3] или [4] в зависимости от условий нагружения и наличия предварительного напряжения арматуры ФАП:

– по СНиП 2.03.01-84*:

$$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) \leq R_f$$

– при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения с разгрузкой перед усилением;

$$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{f0} \leq R_f$$

– при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения под нагрузкой;

$$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) + \sigma_{fp} \leq R_f$$

– при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП с разгрузкой перед усилением;

$$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} + \sigma_{fp} \leq R_f \quad - \text{при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП под нагрузкой,}$$

где $\sigma_{ft} = \varepsilon_{bt} E_f$ – начальные напряжения арматуры ФАП;

$\sigma_{fp} = \varepsilon_{fp} E_f$ – предварительные напряжения арматуры ФАП;

E_f – модуль упругости арматуры ФАП;

ε_{fp} – деформации предварительного напряжения арматуры ФАП;

$$\psi_f = \frac{\varepsilon_{bu} E_f}{1 - \frac{\omega}{1,1}};$$

– СП 52-101-2003:

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) \leq R_f \quad - \text{при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения с разгрузкой перед усилением;}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} \leq R_f \quad - \text{при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения под нагрузкой;}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) + \sigma_{fp} \leq R_f \quad - \text{при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП с разгрузкой перед усилением;}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} + \sigma_{fp} \leq R_f \quad - \text{при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП под нагрузкой,}$$

где $\sigma_{f,ult} = \varepsilon_{b,ult} E_f$.

Методика расчета требуемой площади сечения арматуры ФАП

1) Фактическая высота сжатой зоны до усиления:

$$x_{\phi} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где $A = 0,5b$, $B = (\alpha - 1)A_s' + \alpha A_s$;

$$C = -[(\alpha - 1)A_s' a' + \alpha A_s h_0], \quad \alpha = E_s / E_b.$$

2) Момент инерции приведенного сечения относительно нейтральной оси:

$$I_1 = \frac{bx_\phi^3}{3} + (\alpha - 1)A_s'(x_\phi - a')^2 + \alpha A_s(h_0 - x_\phi)^2.$$

3) Начальная деформация крайней сжатой фибры бетона до усиления:

$$\varepsilon'_{b,нач} = \frac{M_0 x_\phi}{I_1 E_b} \leq 0,0015.$$

4) Начальная деформация крайней растянутой фибры бетона до усиления:

$$\varepsilon_{bt,нач} = \frac{M_0(h - x_\phi)}{I_1 E_b} = \frac{\varepsilon'_{b,нач}(h - x_\phi)}{x_\phi}.$$

5) Граничная относительная высота сжатой зоны бетона (по h_0):
– по СНиП 2.03.01.-84*:

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{bu}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)},$$

где $\omega = 0,85 - 0,008 \cdot R_b$ – характеристика сжатой зоны бетона;

$\varepsilon_{bu} = 0,002$ – предельные деформации бетона при центральном сжатии;

$\varepsilon_{s,el}$ – деформации стальной арматуры, соответствующие R_s ;

– СП 52-101-2003:

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \varepsilon_{s,el} / \varepsilon_{b,ult}},$$

где $\varepsilon_{b,ult} = 0,0035$ – предельные деформации бетона на сжатие при изгибе.

6) Граничная относительная высота сжатой зоны бетона (по h):
– по СНиП 2.03.01.-84*:

$$\xi_{Rf} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{bu}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)};$$

– по СП 52-101-2003:

$$\xi_{Rf} = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{b,ult}}},$$

где $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ без учета начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой;

$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bt,нач}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ с учетом начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой;

$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} - \varepsilon_{fp}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ с учетом деформаций предварительного напряжения арматуры ФАП и без учета начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой;

$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bt,нач} - \varepsilon_{fp}$ – деформации в арматуре ФАП при напряжениях $\sigma_f = R_f$ с учетом начальных деформаций до усиления конструкции под нагрузкой и деформаций предварительного напряжения арматуры ФАП.

$$7) \alpha_{mf} = \frac{M - R_{sc} A'_s (h - a') + R_s A_s a}{R_b b h^2}.$$

8) Граничная относительная высота сжатой зоны бетона (по h):

$$\xi_f = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_{mf}}.$$

9) Проверка условий:

$$\xi_f = \frac{x}{h} \leq \xi_{Rf};$$

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \xi_f \frac{h}{h_0} \leq \xi_R.$$

10) Напряжения в фиброармированном пластике:

– СНиП 2.03.01-84*:

$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) \leq R_f$ – при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения с разгрузкой перед усилением;

$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} \leq R_f$ – при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения под нагрузкой;

$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) + \sigma_{fp} \leq R_f$ – при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП с разгрузкой перед усилением;

$$\sigma_f = \psi_f \left(\frac{\omega}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} + \sigma_{fp} \leq R_f \quad - \text{при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП под нагрузкой,}$$

где $\sigma_{ft} = \varepsilon_{bt} E_f$ – начальные напряжения арматуры ФАП;

$\sigma_{fp} = \varepsilon_{fp} E_f$ – предварительные напряжения арматуры ФАП;

E_f – модуль упругости арматуры ФАП;

ε_{fp} – деформации предварительного напряжения арматуры ФАП;

$$\psi_f = \frac{\varepsilon_{bu} E_f}{1 - \frac{\omega}{1,1}};$$

– СП 52-101-2003:

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) \leq R_f \quad - \text{при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения с разгрузкой перед усилением;}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} \leq R_f \quad - \text{при усилении арматурой ФАП без предварительного напряжения под нагрузкой;}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) + \sigma_{fp} \leq R_f \quad - \text{при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП с разгрузкой перед усилением;}$$

$$\sigma_f = \sigma_{f,ult} \left(\frac{0,8}{\xi} \frac{h}{h_0} - 1 \right) - \sigma_{ft} + \sigma_{fp} \leq R_f \quad - \text{при усилении предварительно напряженной арматурой ФАП под нагрузкой,}$$

где $\sigma_{f,ult} = \varepsilon_{b,ult} E_f$.

11) Требуемая площадь сечения арматуры ФАП

$$A_{f,mp} = \frac{R_b b h \xi_f + R_{sc} A'_s - R_s A_s}{\sigma_f}.$$

12) Назначаем площадь сечения арматуры ФАП

$$A_f \geq A_{f,mp}.$$

Выводы

1. Разработана методика расчета усиления изгибаемых железобетонных конструкций ФАП в рамках метода расчета по предельным состояниям по [3] и [4].
2. Данная методика позволяет определять требуемую площадь ФАП:
 - с предварительной разгрузкой перед усилением;
 - под нагрузкой;
 - с разгрузкой и предварительным напряжением ФАП;
 - под нагрузкой с предварительным напряжением ФАП.
3. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций под нагрузкой приводит к уменьшению значения ζ_{Rf} (границной относительной высоты сжатой зоны бетона по h).
4. Предварительное напряжение ФАП повышает значение ζ_{Rf} и позволяет эффективно включить ФАП в работу при усилении под нагрузкой.

Библиографический список

1. Попов В.М. Оценка напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композиционными материалами. В кн.: Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сборник научных трудов, выпуск 8. – М., 2009. С.449-457.
2. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами / В.Л. Чернявский, Ю.Г. Хаютин, Е.З. Аксельрод, В.А. Клевцов, Н.В. Фаткуллин. – М.: ООО «Итеракава», НИИЖБ, 2006.
3. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. ЦИТП Госстроя СССР, 1991.
4. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М., 2004.
5. Шилин А.А. и др. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Каргузов. – М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2004.