
К расчету железобетонных колонн со смешанным армированием

В.Е. Чубаров, А.Г. Умаров, В.Д. Маилян

Донской государственной технической университет

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы эффективного использования комбинированного предварительного напряжения арматуры, в зависимости от вида конструкции и условий ее эксплуатации. Изложены основные положения расчета минимального количества преднапряженной арматуры при предъявлении к железобетонным элементам требований 1-й, 2-й и 3-й категорий трещиностойкости.

Ключевые слова: бетон, арматура, сталь, железобетон, предварительное напряжение, трещиностойкость, жесткость, несущая способность, деформации.

Эффективное использование высокопрочной арматуры в железобетонных конструкциях - важная и актуальная задача сегодняшнего дня. Исследования отечественных и зарубежных ученых показывают, что наиболее целесообразным являются сочетания в сечении преднапряженной и ненапрягаемой арматуры [1-4]. При этом в зависимости от вида конструкции и условий ее эксплуатации в одних случаях наиболее эффективно использовать предварительно растянутую и ненапрягаемую сталь, а в других предварительно сжатую и ненапрягаемую.

При проектировании сжатых железобетонных элементов с предварительно напряженной арматурой следует стремиться к уменьшению количества предварительно растянутой арматуры в гибких стойках, и наоборот, к увеличению предварительно сжатой в коротких элементах, имеющих этот вид арматуры.

В колоннах с предварительно растянутой арматурой, использование которой повышает жесткость сечений и сопротивление продольному изгибу, увеличение относительного содержания напрягаемой арматуры позволяет снизить общий расход стали (напрягаемой и ненапрягаемой) за счет возможности обрывов напрягаемой арматуры в соответствии с огибающими эпюрами внутренних усилий. А помимо этого также за счет снижения трудоемко-

сти изготовления, в связи с необходимостью напряжения и анкеровки преднапряженной арматуры.

В железобетонных элементах с предварительно сжатой арматурой увеличение ее относительно содержания позволяет существенно снизить общий расход стали, так как возрастает относительное количество арматуры, работающей с более высоким предельным напряжением сжатия при разрушении конструкции [5-10].

В элементах с предварительно сжатой арматурой ненапрягаемая сталь необходима, так как она обеспечивает повышение трещиностойкости конструкции при передаче технологических (предварительных) растягивающих напряжений на бетон и ненапрягаемую арматуру. Процентное содержание такой арматуры должно быть минимально необходимым для обеспечения требуемой технологической трещиностойкости, которая определяется в соответствии с нормами, либо отсутствием трещин, либо их ограниченным раскрытием. Граничные условия устанавливаются расчетами по образованию или раскрытию трещин.

В гибких сжатых элементах, армированных предварительно растянутой и ненапрягаемой арматурой для определения минимального количества преднапряженной арматуры необходимо соблюдение следующих условий. Так, наименьший расход стали будет получен тогда, когда ненапрягаемая арматура предусматривается класса аналогичного предварительно напряженной. При этом важно обеспечить условия, при которых напряжения в ненапрягаемой арматуре к моменту разрушения балок достигали бы максимально допустимых напряжений $\gamma_d / \sigma_{0,2}$, где коэффициент γ_d учитывает работу арматуры за условным пределом текучести. Если условие не соблюдается, ненапрягаемая арматура в элементе будет использоваться не полностью, а это, в свою очередь, приведет к снижению эффективности ее использования. В

этом случае класс ненапрягаемой арматуры следует понижать до тех пор, пока ее прочностные свойства не будут полностью реализованы.

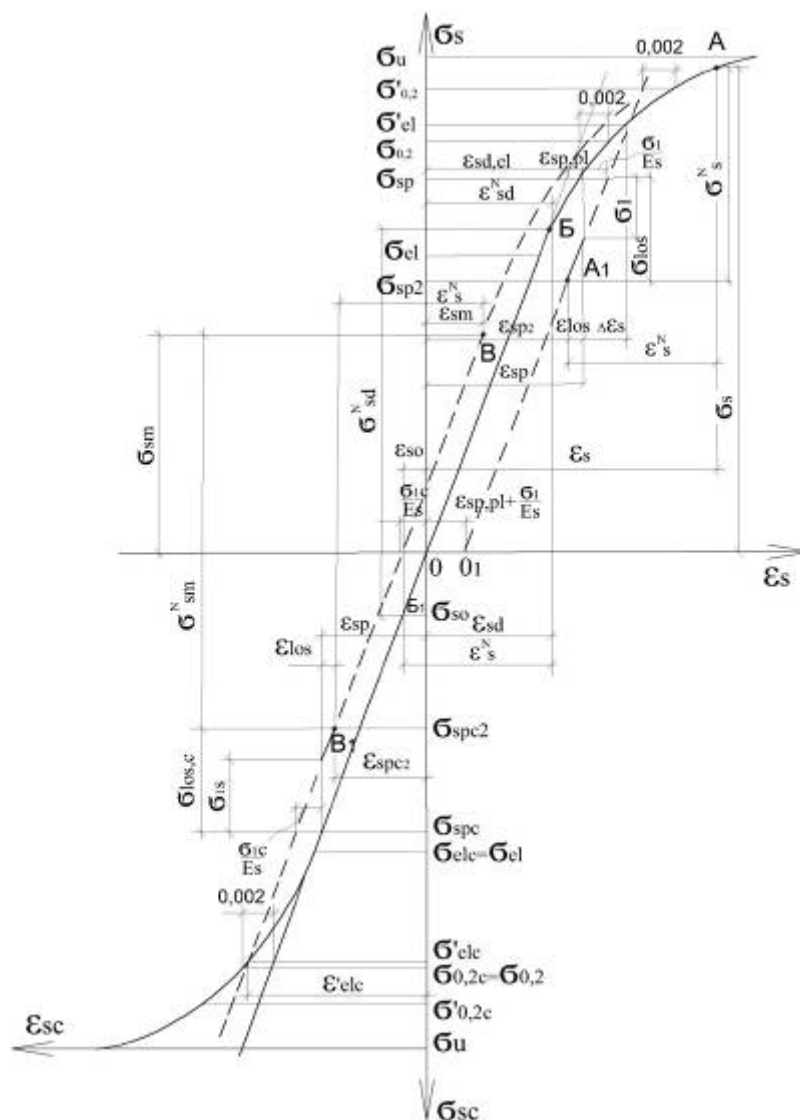


Рис. 1. – Определение напряжений в предварительно растянутой, предварительно сжатой и ненапрягаемой арматуре при ее расположении в растянутой от внешней нагрузки зоне сечения

Расчетный анализ, выполненный авторами [1-4], показывает, что на уровень напряжений в ненапрягаемой арматуре σ_{sd}/σ_s (отношение предельных напряжений в ненапрягаемой арматуре к напряжению в преднапряженной) или $\sigma_{sd}/\gamma_a \sigma_{0.2}$ основное влияние оказывает отношение высоты сжатой

зоны к ее граничному значению ξ/ξ_R и степень преднапряжения арматуры $\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}$. С их увеличением степень использования ненапрягаемой арматуры (σ_{sd}/σ_s и $\sigma_{sd}/\gamma_d\sigma_{0,2}$) снижается. Максимально допустимые напряжения $\gamma_d\sigma_{0,2}$ в ненапрягаемой арматуре элементов со смешанным армированием достигаются при $\xi/\xi_R \leq A$, где A зависит от уровня преднапряжения. В элементах из тяжелого бетона с повышением уровня преднапряжения $\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}$ с 0,55 до 0,85 параметр A , как показали опыты [3, 4], уменьшается с 0,55 до 0,45. Однако при более высоких значениях ξ/ξ_R отношение σ_{sd}/σ_s существенно зависит от уровня преднапряжения.

Следует отметить, что упомянутые опыты показали, что зависимости σ_{sd}/σ_s или $\sigma_{sd}/\gamma_d\sigma_{0,2}$ от ξ/ξ_R и $\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}$ остаются практически неизменными при любом соотношении усилий, воспринимаемых ненапрягаемой и преднапряженной арматурой. Это соотношение не оказывает заметного влияния на степень использования ненапрягаемой арматуры, а также несущую способность элемента. Исключение составляют только сжатые элементы достаточно большой гибкости. В них для обеспечения устойчивости требуется создание предварительного обжатия определенного уровня.

Таким образом минимально допустимое количество предварительно растянутой арматуры при принятом (как правило, наибольшим) уровне преднапряжения следует установить из условия обеспечения требуемой трещиностойкости и жесткости элемента.

Определим минимально необходимое количество арматуры A_{sp} , обеспечивающее удовлетворение требований трещиностойкости внецентренно сжатого элемента. При этом общее содержание продольной арматуры растянутой зоны элемента $A_{sp,s}=A_{sp}+A_s$ и уровень преднапряжения ($\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}$) арматуры A_{sp} известны из расчета несущей способности.

При предъявлении к элементу требований 1-й категории трещиностойкости момент образования трещин может быть определен по известной формуле:

$$M_r = R_{bt,ser} W_{pl} + P_2 (e_{op,2} + r), \quad (1)$$

где P_2 и $e_{op,2}$ – усиление обжатия за вычетом всех потерь и его эксцентриситет.

Подставив в (1) выражения для P_2 и $e_{op,2}$ после преобразований получим:

$$A_{sp} = \frac{M_r - R_{bt,ser} W_{pl} - B}{\sigma_{sp2}(r + y_{sp}) + \sigma_{p\alpha}(r + y_s)}, \quad (2)$$

$$\text{где } B = \sigma'_{sp2} A'_{sp} (r - y'_{sp}) - \sigma_{p\alpha} A_{sp,s} (r + y_s) - \sigma'_{p\alpha} A'_s (r - y'_s), \quad (3)$$

$\sigma_{p\alpha} = \sigma_6 + \sigma_8 + \sigma_9$ – потери преднапряжений от быстронатекающей ползучести, усадки и длительной ползучести бетона;

Для проектируемого железобетонного элемента при заданном внешнем усилии по формулам (2) и (3) можно определить минимально необходимую площадь сечения преднапряженной арматуры, которая обеспечивает отсутствие в элементе трещин.

При предъявлении к железобетонным элементам требования 2-й или 3-й категории трещиностойкости, минимальное количество преднапряженной арматуры определяется из условия равенства ширины раскрытия трещин при заданной нагрузке максимально допустимой.

С целью учета неупругой работы арматуры преобразуем формулу норм для внецентренно сжатых и изгибаемых элементов в следующем виде:

$$\sigma_{сгр} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s l_s \cdot \varepsilon_{sp}^N, \quad (4)$$

где ε_{sp}^N – приращение деформаций преднапряженной арматуры с момента погашения обжатия бетона, включая упругие и неупругие деформации (на рисунке 1 эта деформация обозначена ε_s^N).

При заданном (допустимом) значении α_{crs} из выражения (4) определим предельно допустимое значение ε_{sp}^N .

Из рисунка 1 видно, что:

$$\varepsilon_{sp2} = \sigma_{sp2}/E_{sp} + \varepsilon_{sp,pl} + \sigma_1/E_{sp} . \quad (5)$$

Полная деформация преднапряженной арматуры

$$\varepsilon_s = \sigma_s/E_{sp} + \varepsilon_{p,pl} ; \quad (6)$$

с другой стороны

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{sp2} + \varepsilon_{sp}^N , \quad (7)$$

откуда

$$\varepsilon_{sp}^N = \sigma_s/E_{sp} + \varepsilon_{p,pl} - \varepsilon_{sp2} \quad (8)$$

В выражениях (5)...(8)

$\varepsilon_{sp,pl}$ – пластическая часть деформации арматуры при напряжениях σ_{sp} ;

$\varepsilon_{p,pl}$ – то же, при напряжениях σ_s ;

ε_{sp2} – полная деформация, соответствующая напряжению σ_{sp2} (преднапряжению за вычетом всех потерь).

Для определения пластических деформаций арматуры воспользуемся рекомендациями [5]. Из общей зависимости между деформациями и напряжениями на участке от предела упругости стали до развития деформаций в 1,5% вычтем упругие деформации:

$$\varepsilon_{p,pl} = \frac{K_0}{A - \sigma_s} - D + \frac{\sigma_s(1,9 \cdot 10^3 - E_s)}{190E_s} - \frac{\sigma_s}{E_s} , \quad (9)$$

где K_0 , A и D для конкретных видов арматуры определяется по рекомендациям [5].

С целью определения $\varepsilon_{sp,pl}$ в правую часть выражения (9) вместо σ_s следует подставить σ_{sp} , а потом по формуле (5) вычисляется ε_{sp2} .

Подставляя в (8) значения ε_{sp2} и $\varepsilon_{p,pl}$, получим уравнение, из которого определяется σ_s . Вначале σ_s определяется в предположении упругой работы арматуры ($\sigma_s \leq \sigma_{st}$), т.е. при $\varepsilon_{p,pl} = 0$. Если окажется, что $\sigma_s > \sigma_{st}$, то учитывается и пластическая деформация, как указано выше.

Приращение напряжений в предварительно напряженной арматуре получим как разность

$$\sigma_s^N = \sigma_s - \sigma_{sp2}, \quad (10)$$

а в ненапрягаемой арматуре, имея в виду, что $\varepsilon_s^N = \varepsilon_{sp1}^N$ получим

$$\sigma_{sp} = \varepsilon_s^N \cdot E_s. \quad (11)$$

При соблюдении условия ($\sigma_{sd}^N - \sigma_{p\alpha} \leq \sigma_{st}$) найденное значение σ_{sd}^N является окончательным, в противном случае по деформациям $\varepsilon_{sd}^N = \varepsilon_s^N - \varepsilon_{p\alpha}$ определяется новое значение σ_{sd} из уравнения [5]. Следующим этапом определяется приращение напряжений в ненапрягаемой арматуре

$$\sigma_{sd}^N = \sigma_{sd} - \sigma_{pu}. \quad (12)$$

Составляем уравнение равновесия

$$\sigma_s^N A_{sp} + \sigma_{sd}^N A_s = [N e_s - P_2 (Z - e_{sp})] / Z. \quad (13)$$

Расстояние e_{sp} от усилия обжатия P_2 до равнодействующей усилия в арматуре растянутой (менее сжатой) зоны удобно определять из уравнения моментов относительно оси, проходящей через указанную равнодействующую.

Подставляя в (13) выражение P_2 и $A_s = A_{sp,s} - A_{sp}$ – после преобразований получим

$$A_{sp} = \frac{Ne_s + A_{sp}s(\sigma_{pa}z - \sigma_{pa}e_{sp} - \sigma_{sd}^N z) + A_{sp}'\sigma_{sp2}'(e_{sp} - z) + A_s'\sigma_{pa}'(z - e_{sp})}{z(\sigma_s^N - \sigma_{sd}^N + \sigma_{sp2} + \sigma_{pa}) - e_{sp}(\sigma_{sp2} + \sigma_{pa})}. \quad (14)$$

Для определения A_{sp} по формуле (14) необходимо предварительно вычислить ряд величин, зависящих от A_{sp} и A_s , поэтому соотношением площадей сечений преднапряженной и ненапрягаемой арматуры, следует задаться. После этого вычисляются значения σ_{sp2}' ; σ_{pa} ; σ_{pa}' ; P_2 ; e_{sp} и z , а затем A_{sp} . Если полученное значение A_{sp} будет отличаться от принятого, то расчет повторяется при новом значении A_{sp} и заканчивается при допустимой разнице A_{sp} двух последних итераций.

Установленные из условий трещиностойкости элемента минимально необходимые значения A_{sp} должны удовлетворять также требованиям по деформациям, а для элементов 2-й категории трещиностойкости также по закрытию трещин.

Литература

1. Кубасов А.Ю. Повышение экономической эффективности железобетонных элементов методом комбинированного преднапряжения высокопрочной стержневой арматуры. Обзорение прикладной и промышленной математики. // Научное издание "ТВП", М. – 2001. С. 86-90.
2. Маилян Д.Р., Кубасов А.Ю. К вопросу эффективного использования высокопрочной арматуры в железобетонных элементах. Обзорение прикладной и промышленной математики. // Научное обозрение "ТВП" М. – 2001. С. 262-263.
3. Хунагов Р.А., Маилян Д.Р. Расчет двухслойных предварительно напряженных железобетонных панелей. // Вестник МГТУ, вып. №4, Май-коп, 2011. С. 33.

4. Кургин К.В., Маилян Д.Р., Блягоз А.М. Совершенствование расчета прочности керамзитовых элементов со смешанным армированием. // Вестник МГТУ, №4, 2011. С. 18.
5. Мекеров Б.А., Маилян Р.Л. Аналитические описания для диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали. Новые виды арматуры и ее сварка. // Доклады Всесоюзного совещания в Волгограде. М. – 1982. С. 166-171.
6. Польской П.П., Маилян Д.Р., Мерват Хишмак и др. О деформативности изгибаемых элементов из тяжелого бетона при двухрядном расположении углепластиковой и комбинированной арматуры // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094
7. Маилян Д.Р., Польской П.П. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин // Инженерный вестник Дона, 2013, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1675
8. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления // Инженерный вестник Дона, 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374
9. Metin Husem, Selim Pul. Investigation of strain models for confined high strength concrete // «Sadhama» Vol. 32, Part 3, June 2007, pp 243-253. –India.
10. Mendi Sadeghi eHabashi. Ultra high performance and high early strength concrete // 36th Conference on Our World in Concrete Structures & «Singapore», 2011, pp 15-18.

References

1. Kubasov A.Yu. Nauchnoe izdanie "TVP", М. 2001.
 2. Mailyan D.R., Kubasov A.Yu. Nauchnoe obozrenie "TVP" М. 2001. pp. 262-263. pp. 86-90.
 3. Khunagov R.A., Mailyan D.R. Vestnik MGTU, №4, Майкоп, 2011. p. 33.
-



4. Kurgin K.V., Mailyan D.R. Vestnik MGTU, №4, 2011. p. 18.
5. Mekerov B.A., Mailyan R.L. Doklady Vsesoyuznogo soveshchaniya v Volgograde. M. 1982. pp. 166-171.
6. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R., Mervat Khishmak i dr. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094
7. Mailyan D.R., Pol'skoy P.P. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1675
8. Mailyan D.R., Pol'skoy P.P., Georgiev S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374
9. Metin Husem, Selim Pul. Investigation of strain models for confined high strength concrete. «Sadhama» Vol. 32, Part 3, June 2007, pp. 243-253. India.
10. Mendi Sadeghi eHabashi. Ultra high performance and high early strength concrete. 36th Conference on Our World in Concrete Structures & «Singapore», 2011, pp. 15-18.