

## К проектированию железобетонных конструкций со смешанным армированием

М.С. Стемковский<sup>1</sup>, З.А. Меретуков<sup>2</sup>, В.Д. Маилян<sup>1</sup>, А.Ю. Кубасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет

<sup>2</sup> Майкопский государственный технологический университет

**Аннотация:** В данной статье рассматривается проблематика применения высокопрочной стальной арматуры в гибких сжатых железобетонных элементах. Рассматриваются условия для установления минимально необходимой доли преднапряженной арматуры в гибких колоннах с предварительно растянутой арматурой при смешанном армировании.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, конструкции, технологии, монтаж, железобетонные конструкции, растяжение, преднапряжение, балки, армирование, эффективность.

Проблема эффективного использования в сжатых железобетонных элементах высокопрочной стальной арматуры имеет большое значение, т.к. ее успешное решение позволит сберечь миллионы тонн стали [1-3].

Применение высокопрочной стальной арматуры в гибких сжатых железобетонных элементах связано с необходимостью предварительного обжатия бетона для повышения трещиностойкости, жесткости и устойчивости элементов, что достигается путем предварительного растяжения арматуры. Такое решение весьма эффективно также в негибких элементах при значительных эксцентриситетах продольного сжимающего усилия. Однако при малых эксцентриситетах в коротких элементах, исчерпание несущей способности которых обусловлено прочностью (но не устойчивостью), предварительное растяжение арматуры и обжатие бетона ведут к снижению несущей способности, поэтому от него следует отказаться. В таких случаях повышение эффективности использования высокопрочной арматуры обуславливается мерами, направленными на увеличение предельных сжимающих напряжений в арматуре при разрушении элемента.

---

К ним относится применение косвенного армирования выдержка изделия при его изготовлении под сжимающей нагрузкой, близкой к эксплуатационной, предварительное загрузке арматуры внешней сжимающей нагрузкой до включения в работу бетона, использование упругих прокладок и др. [3-5].

Все эти предложения направлены на повышение напряжений в сжатой арматуре при разрушении окружающего бетона, предельные деформации которого ограничены.

Предельные деформации сжатия  $\epsilon_{\text{вж}}$ , соответствующие призмочной прочности бетона  $R_{\text{в}}$ , при центральном сжатии приняты в нормах равными  $2 \cdot 10^{-3}$  при кратковременном действии нагрузки и  $2,5 \cdot 10^{-3}$  при длительном. Исходя из этого, назначены максимальные значения расчетных сопротивлений арматуры сжатию, равные 400 и 500 МПа. Учитывая, однако, что при определенных условиях при разрушении сжатых бетонных и железобетонных элементов возможна реализация нисходящего участка диаграммы деформирования бетона максимальные реализованные деформации сжатия бетона  $\epsilon_{\text{вж, макс}}$ , могут существенно превосходить значения  $\epsilon_{\text{вж}}$ . К условиям, обуславливающим реализацию нисходящего участка диаграммы деформирования бетона, относятся, в частности, неоднородное напряженное состояние сечений или наличие арматуры. В этих случаях деформирование происходит в связных условиях, что приводит к образованию нисходящего участка не только при постоянной скорости деформирования, но и при неизменной скорости нагружения. Благодаря этому явлению во многих опытах были зафиксированы «предельные» деформации бетона и максимальные напряжения сжатия в арматуре, существенно превышающие значения, принятые в нормах.

При проектировании железобетонных колонн с предварительно напряженной арматурой следует стремиться к уменьшению количества предварительно растянутой арматуры в элементах с предварительно

---

растянутой арматурой, и наоборот, к увеличению количества предварительно сжатой арматуры – в элементах с предварительно сжатой. В колоннах с предварительно растянутой арматурой увеличение относительного содержания напрягаемой арматуры позволяет сократить общий расход стали за счет возможности обрывов напрягаемой арматуры в соответствии сгибающимися эпюрами внутренних усилий и кроме того, за счет снижения трудоемкости изготовления, связанной с напряжением и анкерровкой преднапряженной арматуры. В элементах же с предварительно сжатой арматурой повышение относительного ее содержания позволяет существенно снизить расход стали, поскольку возрастает относительное содержание арматуры, работающей со значительно более высоким предельным напряжением сжатия в арматуре при разрушении бетона [6-8].

В элементах с предварительно сжатой арматурой ненапрягаемая сталь устанавливается с целью повышения трещиностойкости при передаче предварительных растягивающих напряжений на бетон и ненапрягаемую арматуру. Количество последней должно быть минимально необходимым для обеспечения требуемой технологической трещиностойкости (отсутствие трещин или ограниченное их раскрытие). Оно устанавливается расчетами по образованию или раскрытию трещин.

В гибких колоннах с предварительно растянутой арматурой при смешанном армировании для установления минимально необходимой доли преднапряженной арматуры необходимо соблюдение ряда условий [9].

Наименьший расход стали будет получен в тех случаях, когда напрягаемая арматура предусматривается такого же класса, как предварительно напряженная. В таких элементах важно обеспечить условия, при которых напряжения в ненапрягаемой арматуре при разрушении балок достигали бы максимально допустимых напряжений  $\sigma_{ad}$ , где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий работу арматуры за условным пределом

---

текучести. В противном случае не напрягаемая арматура будет использоваться не полностью, что приведет к снижению эффективности ее применения. Когда эти условия не обеспечиваются, класс ненапрягаемой арматуры следует понижать с тем, чтобы его прочностные свойства были полностью реализованы.

Анализ, выполненный на кафедре железобетонных и каменных конструкций АСА ДГТУ, показывает, что на уровень напряжений в ненапрягаемой арматуре  $\sigma_{sd}/\sigma_s$  (отношение предельных напряжений в ненапрягаемой арматуре к напряжению в преднапряженной) или  $\sigma_{sd}/\eta\sigma_{0.2}$  основное влияние оказывают отношение высоты сжатой зоны к ее граничному значению  $\xi/\xi_R$  и степень преднапряжения арматуры  $\sigma_{sp}/\sigma_{0.2}$ . С их увеличением степень использования ненапрягаемой арматуры ( $\sigma_{sd}/\sigma_s$  и  $\sigma_{sd}/\eta\sigma_{0.2}$ ) снижается. Максимально допустимые напряжения  $\eta\sigma_{0.2}$  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 [10], уменьшается с 0,55 до 0,45. Однако при более высоких значениях  $\xi/\xi_R$  отношение  $\sigma_{sd}/\sigma_s$  существенно зависит от уровня преднапряжения.

Следует отметить, что упомянутые опыты показали, что зависимости  $\sigma_{sd}/\sigma_s$  или  $\sigma_{sd}/\eta\sigma_{0.2}$  от  $\xi/\xi_R$  и  $\sigma_{sp}/\sigma_{0.2}$  остаются практически неизменными при любом соотношении усилий, воспринимаемых не напрягаемой и преднапряженной арматурой. Количество предварительно растянутой арматуры не оказывает влияния на степень использования ненапрягаемой арматуры и несущую способность элемента. Исключение могут оставить лишь сжатые элементы большой гибкости, в которых для обеспечения

устойчивости потребуется создание предварительного обжатия определенного уровня.

Таким образом, минимально допустимое значение количества растянутой арматуры при принятом (желательно наибольшем) уровне преднапряжения арматуры следует установить из условия обеспечения требуемой трещиностойкости и жесткости элемента [11].

Определим минимально необходимое количество предварительно растянутой арматуры обеспечивающее удовлетворение требований трещиностойкости внецентренно сжатого элемента при известном из расчета несущей способности общем содержании продольной арматуры растянутой зоны элемента  $A_{сп,с} = A_{сп} + A_s$  и принятом уровне преднапряжения  $(\sigma_{сп}/\sigma_{с,с})$  арматуры  $A_{сп}$ .

Если к элементу предъявляются требования 1-й категории трещиностойкости, то:

$$M_r = R_{в,с,с} W_{р1} + R_s (\sigma_{сп,с} + r), \quad (1)$$

где  $R_s$  и  $\sigma_{сп,с}$  – усилие обжатия за вычетом всех потерь и его эксцентриситет.

Подставив в (1) выражения для  $R_s$  и  $\sigma_{сп,с}$  после преобразований получим:

$$A_{сп} = \frac{M_r - R_{в,с,с} - B}{\sigma_{сп,с} (r + \gamma_{сп}) + \sigma_{с,с} (r - \gamma_s)}, \quad (2)$$

$$\text{где } B = \sigma_{сп,с}^н A_{сп}^н (r - \gamma_{сп}^н) - \sigma_{с,с} A_{сп,с} (r + \gamma_s) - \sigma_{с,с}^н A_s^н (r - \gamma_s^н); \quad (3)$$

$\sigma_{с,с}$  – потери преднапряжений от быстро натекающей ползучести, усадки и длительной ползучести бетона;

Остальные обозначения – по нормам.

При заданном внешнем усилии и других данных по формулам (2) и (3) можно определить минимально необходимую площадь сечения предварительно напряженной арматуры, обеспечивающую отсутствие в элементе трещин.

В железобетонных элементах, к которым предъявляются требования 2-й или 3-й категории трещиностойкости, минимальное содержание преднапряженной арматуры определяется из условия равенства ширины раскрытия трещин при заданной нагрузке максимально допустимой.

Для учета неупругой работы арматуры преобразуем формулу норм и представим ее для внецентренно сжатых и изгибаемых элементов в виде:

$$\alpha_{cr} = \varphi_2 \eta \cdot 20(3,5 - 100\mu) \sqrt{d} \cdot \varepsilon_{sp}^N, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{sp}^N$  – приращение деформаций преднапряженной арматуры (измененное с состояния погашения обжатия бетона), включая упругие и неупругие деформации.

При заданном допустимом значении  $\alpha_{cr}$  из выражения (4) определим предельно допустимое значение  $\varepsilon_{sp}^N$ .

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

Полная деформация преднапряженной арматуры:

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

С другой стороны

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

откуда

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

В выражениях (5) – (8):

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

$\varepsilon_{sp,pl}$  – то же, при напряжениях  $\sigma_s$ ;

$\varepsilon_{sp2}$  – полная деформация, соответствующая напряжению  $\sigma_{sp2}$  (преднапряжению за вычетом всех потерь).

Для определения пластических деформаций арматуры воспользуемся следующей зависимостью.

$$\varepsilon_{sp,pl} = \frac{K_o}{A - \sigma_s} - D + \frac{\sigma_s(1,9 \cdot 10^8 - E_s)}{190E_s} - \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (9)$$

где  $K_o$ ,  $A$  и  $D$  для конкретных видов арматуры определяется.

Для вычисления  $\varepsilon_{sp,pl}$  в правую часть выражения (9) вместо  $\sigma_s$  следует подставить  $\sigma_{sp}$ . Затем по формуле (5) вычисляется  $\varepsilon_{sp,pl}$ .

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

Приращение напряжений в предварительно напряженной арматуре получим как разность:

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

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

$$\sigma_{sd} = \varepsilon_s^N \cdot E_s, \quad (11)$$

При соблюдении условия  $(\sigma_{sd}^N - \sigma_{s,so}) \leq \sigma_{ct}$  найденное значение  $\sigma_{sd}^N$  является окончательным в противном случае по деформациям  $\varepsilon_{sd}^N = \varepsilon_s^N - \sigma_{s,so}$  определяется новое значение  $\sigma_{sd}$ . Зачем определяется приращение напряжений:

$$\sigma_{sd}^N = \sigma_{sd} + \sigma_{s,so} \quad (12)$$

Составляем уравнение равновесия:

$$\sigma_s^N A_{sp} + \sigma_{sd}^N \cdot A_s = [N \varepsilon_s - R_2(z - \varepsilon_{sp})] / z \quad (13)$$

Расстояние  $\varepsilon_{sp}$  от усилия обжатия  $R_2$  до равнодействующей усилия в арматуре растянутой (менее сжатой) зоны удобно определять из уравнения моментов относительно оси, проходящей через указанную равнодействующую [12].

Подставляя в (13) выражение  $R_2$  и  $A_s = A_{sp,pl} - A_{sp}$  – после преобразований получим:

$$A_{сп} = \frac{N\sigma_s + A_{сп,с}(\sigma_{с,ср}z - \sigma_{с,ср}\sigma_{сп} - \sigma_{с,ср}^N z) + A_{сп}^2 \sigma_{сп2}^2 (\sigma_{сп} - z) + A_{сп}^2 \sigma_{с,ср}^2 (z - \sigma_{сп})}{z(\sigma_s^N - \sigma_{с,ср}^N + \sigma_{сп2} + \sigma_{с,ср}) - \sigma_{сп}(\sigma_{сп2} + \sigma_{с,ср})} \quad (14)$$

Для определения  $A_{сп}$  по формуле (14) необходимо предварительно вычислить ряд величин, зависящий от  $A_{сп}$  и  $A_s$ , поэтому соотношением площадей сечений преднапряженной и ненапрягаемой арматуры, следует задаться. После этого вычисляются значения  $\sigma_{сп2}^2$ ,  $\sigma_{с,ср}$ ,  $\sigma_{с,ср}^2$ ,  $R_s$ ,  $\sigma_{сп}^N$  и  $z$ , а затем  $A_{сп}$ . Если полученное значение  $A_{сп}$  будет отличаться от принятого, то расчет повторяется при новом значении  $A_{сп}$  и заканчивается при допустимой разнице  $A_{сп}$  двух последних итераций.

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

### Литература

1. Маилян Д.Р. Способы изготовления колонн с высокопрочной предварительно сжатой арматурой // Бетон и железобетон. 1997. №9. с.25-26.
2. Маилян Д.Р., Маилян Р.Л., Осипов М.В. Рекомендации по расчету и проектированию железобетонных конструкций с комбинированным преднапряжением. г. Ростов-на-Дону: СевкавНИПИагропром, РГСУ, 1999, с.27-29
3. Маилян Д.Р., Маилян Р.Л., Осипов М.В. Железобетонные балки с предварительным напряжением на отдельных участках // Журнал «Бетон и железобетон». 2002, №2, с. 18—20.
4. Маилян Р.Л., Маилян Д.Р., Якокутов М.В. Влияние уровня и знака преднапряжений на сопротивление изгибу железобетонных элементов с комбинированным преднапряжением // Известия вузов. Строительство. 1998, №9. - с.4-7.

5. Маилян Р-Л., Маилян Д.Р., Якокутов М.В. Снижение расхода стали при предварительном сжатии высокопрочной арматуры сжатой зоны изгибаемых железобетонных элементов // Бетон и железобетон. 1999, №1 , с. 20-23.

6. Якокутов М.В., Касабов Д.Г. Условия закрытия технологических трещин в железобетонных элементах с предварительно сжатой арматурой // Сборник трудов «Вопросы технологии бетона и проектирования железобетонных конструкций». г. Ростов-на-Дону: СевкавНИПИАгропром, РГСУ, 1998. с.20-21.

7. F. Fedorik, M. Malaska, R. Hannila, A. Naapala, Improving the thermal performance of concrete-sandwich envelopes in relation to the moisture behaviour of building structures in boreal conditions, Energy and Buildings. 2015, № 107, pp. 226-233.

8. Якокутов М.В., Сизьков С.М. Совершенствование типовых стропильных железобетонных балок // Известия РГСУ. 1999, №3, с. 22-25

9. Янкелевич М.А. К оптимизации смешанного армирования железобетонных элементов. В кн.: Строительные конструкции. Киев: Будивельник, 1995, №1, с. 14-18.

10. J. Yin, W. Wang, Z. Man, S. Khoo, Modeling and analysis of gear tooth crack growth under variable-amplitude loading, Mechanical Systems and Signal Processing. 2013, № 40, pp. 105-113.

11. Польской П.П., Маилян Д.Р. Универсальный метод подбора композитной арматуры для изгибаемых элементов. Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3891).

12. Сербиновский П.А., Маилян Д.Р. Оптимизация конструкций усиления многопустотных плит перекрытия. Инженерный вестник Дона, 2016, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3580](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3580).

---

## References

1. Mailjan D.R. Beton i zhelezobeton. 1997. №9. pp. 25-26.
  2. Mailjan D.R., Mailjan R.L., Osipov M.V. Rekomendacii po raschetu i proektirovaniyu zhelezobetonnyh konstrukcij s kombinirovannym prednaprjazheniem. [Recommendations for the calculation and design of reinforced concrete structures with combined prestressing]. g. Rostov-na-Donu: SevkavNIPIagroprom, RGSU, 1999, pp. 27-29
  3. Mailjan D.R., Mailjan R.L., Osipov M.V. Zhurnal «Beton i zhelezobeton». 2002, №2, pp. 18—20.
  4. Mailjan R.L., Mailjan D.R., Jakokutov M.V. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 1998, №9. pp.4-7.
  5. Mailjan R-L., Mailjan D.R., Jakokutov M.V. Beton i zhelezobeton. 1999, №1, pp. 20-23.
  6. Jakokutov M.V., Kasabov D.G. Sbornik trudov «Voprosy tehnologii betona i proektirovaniya zhelezobetonnyh konstrukcij». g. Rostov-na-Donu: SevkavNIPIagroprom, RGSU, 1998. pp. 20-21.
  7. F. Fedorik, M. Malaska, R. Hannila, A. Haapala, Energy and Buildings. 2015, № 107, pp. 226-233.
  8. Jakokutov M.V., Siz'kov S.M. Izvestija RGSU. 1999, №3, pp. 22-25
  9. Jankelevich M.A. V kn.: Stroitel'nye konstrukcii. Kiev: Budivel'nik, 1995, №1, pp. 14-18.
  10. J. Yin, W. Wang, Z. Man, S. Khoo. Mechanical Systems and Signal Processing. 2013, № 40, pp. 105-113.
  11. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3891](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3891)
  12. Serbinovskij P.A., Mailjan D.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3580](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3580).
-