

**ПРОЧИЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ / OTHER QUESTIONS RELATED TO
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

DOI: <https://www.doi.org/10.18454/mca.2023.2.33.001>

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА В БАЛКАХ
С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ АРМАТУРЫ**

Научная статья

Страхов Д.А.¹, Гизатуллина Д.З.^{2*}, Молев К.И.³

¹ ORCID: 0000-0003-2288-6634;

² ORCID: 0000-0001-7386-0878;

³ ORCID: 0000-0002-0467-960X;

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (gizatyllina_daria[at]mail.ru)

Аннотация

Объектом исследования является эффективное применение высокопрочного бетона в железобетонных балках прямоугольного сечения с преднапряженной арматурой. Цель работы: выявить область рационального использования высокопрочного бетона по критерию трещиностойкости в изгибаемых элементах с преднапряженной арматурой. Рассмотрено влияние повышения класса бетона на стоимость железобетонного изгибаемого элемента прямоугольного сечения с преднапряженной арматурой при расчете по второй группе предельных состояний, а именно в расчете по ширине раскрытия трещин. Анализ производился для балок одинакового сечения при заданной ширине раскрытия трещин, равной предельному значению, и заданной величине предварительного напряжения арматуры. Для достижения требуемой ширины раскрытия трещин было подобрано необходимое количество арматуры в сечениях. Рассчитана стоимость 1 погонного метра балки при использовании различных классов бетона. В результатах исследования обозначена область применения высокопрочного бетона: выявлены значения нагрузки (моментов) и коэффициентов армирования, при которых экономически целесообразно перейти от бетона класса В20 к бетону В60.

Ключевые слова: эффективное применение, высокопрочный бетон, раскрытие трещин, железобетонные балки, коэффициент армирования, предварительное напряжение, преднапряженная арматура.

APPLICATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN BEAMS WITH PRE-STRESSED ACCESSOR

Research article

Strakhov D.A.¹, Gizatullina D.Z.^{2*}, Molev K.I.³

¹ ORCID: 0000-0003-2288-6634;

² ORCID: 0000-0001-7386-0878;

³ ORCID: 0000-0002-0467-960X;

^{1, 2, 3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

* Corresponding author (gizatyllina_daria[at]mail.ru)

Abstract

The object of the study is the effective use of high-strength concrete in reinforced concrete beams of rectangular cross-section with pre-stressed accessor. The aim of the work: to identify the area of rational use of high quality concrete according to the criterion of crack resistance in bending elements with pre-stressed accessor. The influence of an increase in the concrete class on the cost of a reinforced concrete bending element of rectangular cross-section with pre-stressed accessor is examined when calculating the second group of limit states, namely, in calculating the width of crack opening. The analysis was performed for beams of the same cross-section with a given crack opening width equal to the limit value and a given amount of pre-stressing of the accessor. In order to achieve the required crack opening width, the needed amount of reinforcement in sections was selected. The cost of 1 linear meter of a beam is calculated when using different classes of concrete. As a result of the research, the scope of application of high quality concrete was outlined: the values of load moments and reinforcement ratios were identified, at which it is economically feasible to switch from class B20 concrete to B60 concrete.

Keywords: effective application, high quality concrete, crack opening, reinforced concrete beams, reinforcement ratio, pre-stress, pre-stressed accessor.

Введение

Высокопрочный бетон – бетон, имеющий значение прочности на сжатие 60 МПа и выше. Такие бетоны изготавливаются из портландцементного клинкера и обладают улучшенными характеристиками по прочности, трещиностойкости и водонепроницаемости и часто используются при строительстве уникальных и ответственных зданий и сооружений. Однако высокая себестоимость данных материалов и их производства ограничивает применение высокопрочных бетонов при строительстве объектов нормального уровня ответственности: жилых домов, школ, административных зданий и прочих [1].

Множество научных работ посвящено теме экономически эффективного применения высокопрочного бетона [1], [2], [3].

Экономическая целесообразность строительства из высокопрочного песчаного бетона изучается в работах Н.Г Палагина [4], [5]. Утверждается, что повышение классов тяжелого и высокопрочного песчаного бетонов способствует снижению количества предварительно напряженной арматуры, а также в некоторых случаях позволяет не устанавливать поперечную арматуру в изучаемые многпустотные плиты перекрытий. Однако во всех рассматриваемых случаях применение высокопрочного бетона оказалось экономически неэффективным [4]. В работе [5] по изучению целесообразности применения высокопрочного бетона в колоннах производственных зданий с мостовыми кранами получен обратный результат: применение высокопрочного бетона экономически выгоднее на 24,8-109,5%, что ещё раз подтверждает довод о необходимости изучения эффективного применения высокопрочного бетона в различных элементах строительных конструкций. Так, авторы [6] изучают эффективность применения бетонов высоких марок в ростверке свай.

Использование высокопрочного бетона в изгибаемых железобетонных элементах изучают авторы работы [7], цель которой выявить оптимальную высоту слоя бетона класса В90 в сжатой зоне в балке составного сечения. Результатом работы стали расчетные формулы, определяющие относительную высоту сжатой зоны в зависимости от класса арматуры и коэффициента армирования сечения. Проектирование железобетонных элементов составного (двухслойного сечения) исключает перерасход дорогостоящего бетона высоких классов прочности, а полученные зависимости позволяют наиболее эффективно включить элемент в работу конструкции.

В результате исследований очерчены области эффективного использования высокопрочных бетонов в изгибаемых элементах без предварительного напряжения по критериям прочности и трещиностойкости [8], [9], [10]; обозначен экономически эффективный переход от бетона класса В20 к бетону класса В60 при достижении коэффициентов армирования сечения 2,3% и 2,7%.

Данное исследование посвящено поиску области эффективного применения высокопрочного бетона в изгибаемых элементах с предварительным напряжением арматуры.

Методика расчета арматуры с учетом обеспечения прочности и предельной ширины раскрытия трещин

Для решения поставленной задачи выполнены сравнительные расчеты для балок из бетонов обычной и высокой прочности (классов В20 и В60). При этом принимались одинаковые размеры поперечного сечения балок и определялось необходимое количество арматуры (площадь поперечного сечения) при различных значениях изгибающих моментов от внешней нагрузки. Площадь арматуры подбиралась из условий обеспечения предельной ширины раскрытия трещин и обеспечения прочности. Именно из условия обеспечения прочности для балок из бетона В20 появилась необходимость установки сжатой арматуры (А400), хотя сжатая арматура мало влияет на ширину раскрытия трещин. При расчете ширины раскрытия трещин во всех случаях принималась одинаковая величина предварительного напряжения $\sigma_{sp} = 600$ МПа (с учетом всех потерь), а сила предварительного обжатия P – пропорциональной площади растянутой арматуры А1000.

Расчет по раскрытию трещин предполагает, что ширина раскрытия трещин от приложенных к элементу внешних нагрузок (и силы предварительного обжатия P) не должна превышать предельно допустимого значения. В соответствии с действующими нормами, а именно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», предельная ширина раскрытия трещин принята равной 0,2 мм из условий, обозначенных в пункте 8.2.6, при продолжительном раскрытии трещин.

Согласно действующим нормам, ширина раскрытия трещин определяется как:

$$a_{crc} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s, \quad (1)$$

где σ_s – напряжение в растянутой арматуре от внешней нагрузки и силы предварительного обжатия P ;

l_s – расстояние между соседними нормальными трещинами, определяется по (3);

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – коэффициенты, принятые согласно пункту 8.2.15 СП 63.13330.2018.

ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{\sigma_{s,crc}}{\sigma_s}, \quad (2)$$

где $\sigma_{s,crc}$ – напряжение в растянутой арматуре, определяемое сразу после образования нормальных трещин, то есть при $M = M_{crc}$ (где M_{crc} – момент образования трещин).

Расстояние между трещинами определяется согласно п. 8.2.17 СП 63.13330.2018:

$$l_s = 0,5 \cdot \frac{A_{bt}}{A_s} \cdot d_s, \quad (3)$$

и принимается не менее $10d_s$ и 10 см и не более $40d_s$ и 40 см;

где A_{bt} – площадь сечения растянутого бетона, определяемая по высоте растянутой зоны бетона y_t , которая в настоящем исследовании была рассчитана согласно указаниям п. 4.10 пособия [11]. При этом должно выполняться условие $2a < y_t < 0,5h$.

Напряжение в растянутой арматуре изгибаемых предварительно напряженных элементов от внешней нагрузки и силы предварительного обжатия P определяется из условий равновесия и совместности деформаций (с учетом закона плоских сечений) по формулам «упругого железобетона» в соответствии со схемой, приведенной на рис.1 (схемы а и б на рис.1 совершенно идентичны в отношении напряженного состояния элемента в рамках приведенных предпосылок). Из совместного решения соответствующих уравнений для элементов прямоугольного сечения вытекает уравнение относительно высоты сжатой зоны бетона x (при треугольной эпюре напряжений):

$$x^3 - 3 \cdot (h_0 - e_s) \cdot x^2 + \frac{6 \cdot \alpha_{s1}}{b} \cdot (A_s \cdot e_s + A'_s \cdot e'_s) \cdot x - \frac{6 \cdot \alpha_{s1}}{b} \cdot (A_s \cdot h_0 \cdot e_s + A'_s \cdot a' \cdot e'_s) = 0, \quad (4)$$

где h_0 – полезная высота сечения;

b – ширина сечения;

e_s – расстояние от точки приложения силы предварительного обжатия P с учетом влияния изгибающего момента M от внешней нагрузки до центра тяжести сечения растянутой арматуры, вычисляемое по (5);

α_{s1} – коэффициент приведения арматуры к бетону, определяемый по (7);

$$e_s = M/P, \quad (5)$$

$$e'_s = e_s - h_0 + a', \quad (6)$$

$$\alpha_{s1} = E_s/E_{b,red}, \quad (7)$$

где $E_{b,red}$ – приведенный модуль деформации сжатого бетона, учитывающий неупругие деформации сжатого бетона и определяемый по формуле

$$E_{b,red} = R_{b,n}/\varepsilon_{b1,red}, \quad (8)$$

где $R_{b,n}$ – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию;

$\varepsilon_{b1,red}$ – относительная деформация бетона, принимаемая равной 0,0015.

После вычисления высоты сжатой зоны бетона x напряжение в растянутой арматуре может быть определено из уравнения проекций:

$$\sigma_s = \alpha_{s1} \cdot \frac{h_0 - x}{x} \cdot P / \left(\frac{b \cdot x}{2} - \alpha_{s1} \cdot A_s \cdot \frac{h_0 - x}{x} + \alpha_{s1} \cdot A'_s \cdot \frac{x - a'}{x} \right) \quad (9)$$

Аналогичным образом определяется величина $\sigma_{s,crc}$, при вычислении которой в формулу для e_s вместо M подставляется величина M_{crc} .

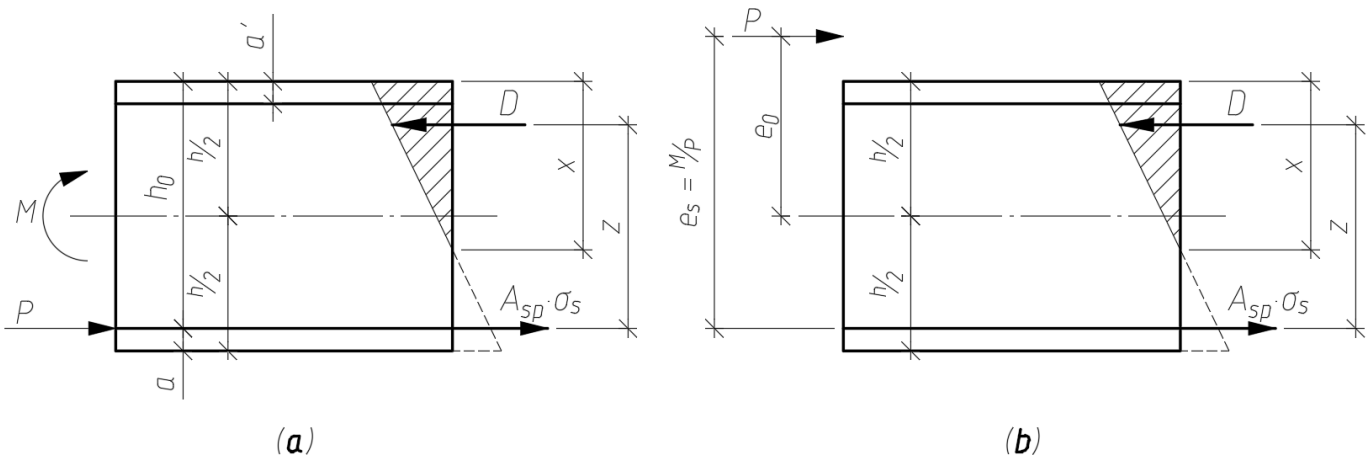


Рис. 1 – К определению напряжений в арматуре для преднапряженных изгибаемых элементов:
 M – изгибающий момент от внешних нагрузок, P – сила предварительного обжатия

Критерии оценки эффективности применения высокопрочного бетона

Оценка эффективности применения высокопрочного бетона в изгибаемых элементах с преднапряженной арматурой производится по минимальной стоимости материалов одного погонного метра балки постоянного поперечного сечения

при различных значениях изгибающего момента, а также фиксированных значениях предварительного напряжения арматуры и ширины раскрытия трещин.

Расчет стоимости 1 погонного метра (п.м.) балки производился по данным сметного сборника ТССЦ-2001 в г. Санкт-Петербург [12], исходя из сметной стоимости материалов без учета НДС и по анализу рынка стройматериалов, в частности для оценки стоимости арматуры класса А1000.

Стоимости 1 кубометра бетона и 1 тонны арматуры были назначены директивно на основе анализа строительного рынка. Расчеты проводились на примере соотношения рыночных цен на сталь и бетон в условиях Российской Федерации по состоянию на октябрь 2022 г. [12]. Методологию расчетов можно считать универсальной, поэтому результаты могут быть использованы в странах с аналогичным соотношением рыночных цен на сталь и бетон.

Основные результаты

Приводятся результаты расчета раскрытия трещин балок постоянного поперечного сечения (размеры приведены в табл. 1) с предварительно напряженной арматурой. Балки имеют различные коэффициенты армирования. Полученное количество арматуры в сечениях удовлетворяет условию прочности по нормальным сечениям и обеспечивает раскрытие трещин в элементе равное предельному значению 0,2 мм.

Для расчетов принята арматура класса А1000 в растянутой зоне бетона, А400 – в сжатой зоне бетона. Модуль упругости стали E_s принят равным $2 \cdot 10^5$ МПа.

Величина предварительного напряжения арматуры (с учетом потерь) в расчетах зафиксирована и принята $\sigma_{sp}=600$ МПа.

Минимальные площади растянутой и сжатой арматуры приняты по условию прочности, расчет произведен по методике, представленной в СП63.13330.2018.

В таблицах 1 и 2 приведены геометрические параметры и характеристики заданных материалов.

Таблица 1 – Размеры сечения балки

b , см	h , см	h_0 , см	a , см	a' , см
30	60	55	5	5

Таблица 2 – Характеристики материалов

Арматура, А400	Арматура, А1000	Бетон, В20				Коэффициент приведения арматуры к бетону
		E_b , МПа, МПа · 10 ⁻³	$R_{bt,ser}$, МПа	$R_{b,n}$, МПа	$E_{b,red}$, МПа · 10 ⁻³	
$2 \cdot 10^5$		27,5	1,35	15	10	7,27
		Бетон, В60				5,06
		E_b , МПа, МПа · 10 ⁻³	$R_{bt,ser}$, МПа	$R_{b,n}$, МПа	$E_{b,red}$, МПа · 10 ⁻³	
		39,5	2,75	43	28,67	

Для расчета стоимости 1 п.м. балки были использованы сметные сборники [12] и проанализирован рынок строительных материалов для г. Санкт-Петербург. Стоимость арматурной стали горячекатаной класса АIII(А400) по ГОСТ 5781-82 была рассчитана как среднее значение стоимости 1 т арматуры и составила 46301,1 руб. [12]. Стоимость арматурной стали горячекатаной класса А1000 по ГОСТ 5781-82 определена как среднее значение выборки предложений на рынке строительных материалов и составила 50749,0 руб.

Стоимости бетонов классов В20 и В60 на 1 п.м. балки были рассчитаны согласно данным [12] по коду ресурса 401-0007 и 401-0217 соответственно. Стоимость 1 п.м. бетона была получена путём перемножения площади поперечного сечения балки и стоимости 1 м³ бетона, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета стоимости 1 п.м. бетона

Класс бетона	Стоимость 1м ³ , руб.	Стоимость 1 п.м., руб.
		для балки постоянного поперечного сечения 30х60, см
В20	5106,78	919,22
В60	7742,32	1393,62

В таблице 4 приведены результаты подбора площадей растянутой (A_{sp}) и сжатой (A'_s) арматуры, а также общие проценты армирования сечений (μ), полученные при заданных расчетных моментах, постоянной величине предварительного напряжения $\sigma_{sp}=600$ МПа и ширине раскрытия трещин, равной 0,2 мм.

Коэффициент армирования μ рассчитывается как отношение площади сечения арматуры к рабочему сечению бетона. При наличии в сечении сжатой арматуры она также учитывается в расчете коэффициента армирования (в расчете используется сумма площадей поперечных сечений растянутой и сжатой арматуры).

Результаты расчета стоимости S погонного метра балок представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты анализа

M , кН·м	σ_{sp} , МПа	Класс бетона	M_{crc} , кН·м	A_{sp} , см ²	A'_{s} , см ²	$A_s + A'_{s}$, см ²	μ , %	S , руб.	a_{crc} , мм
320	600	B20	224,9	9,10	-	9,10	0,55	1281,75	0,2
		B60	248,7	8,60	-	8,60	0,52	1736,22	
420		B20	269,8	11,14	3,06	14,20	0,86	1474,18	
		B60	299,9	11,00	-	11,00	0,67	1831,84	
520		B20	317,9	13,44	8,77	22,21	1,35	1773,46	
		B60	339,3	12,85	-	12,85	0,78	1905,54	
620		B20	362,4	15,74	14,49	30,23	1,83	2072,73	
		B60	378,2	14,68	-	14,68	0,89	1978,44	
720		B20	423,1	18,04	20,20	38,24	2,32	2372,01	
		B60	429,6	17,48	-	17,48	1,06	2089,83	

Из анализа результатов расчета можно сделать вывод, что использование высокопрочного бетона в изгибаемых элементах с преднапряженной арматурой при малых процентах армирования экономически нецелесообразно.

При одинаковом раскрытии трещин и одинаковой несущей способности балки заданных параметров ($b=30$ см, $h=60$ см, $h_0=55$ см) применение бетона класса В20 приблизительно на 30% экономичнее по сравнению с бетоном класса В60 при коэффициентах армирования балок менее 1%.

Однако при достижении изгибающего момента величины, равной приблизительно 580 кН·м, и приближении коэффициента армирования балки из бетона В20 к 1,63%, использование бетона класса В60 становится экономически более эффективным.

Для наглядного отображения результатов расчета приведены графики: зависимости стоимости 1 п.м. балки от величины изгибающего момента (рисунок 2), зависимости стоимости 1 п.м. балки от коэффициента армирования для балки из бетона В20 (рисунок 3).

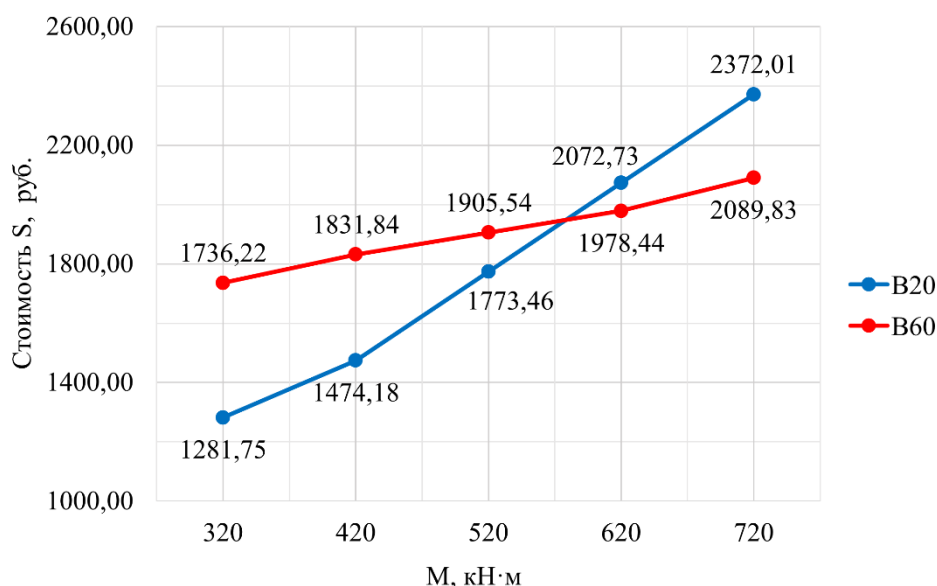
Рис. 2 – График зависимости стоимости 1 п.м. балки от момента M при классах бетона В20 и В60

График на рис.2 отражает зависимость роста стоимости 1 погонного метра балки сечением 30х60 см из бетонов класса В20 и В60 при увеличении значения величины изгибающего момента от внешней нагрузки. Так эффективный переход к высокопрочному бетону возможен при превышении нагрузки, соответствующей значению изгибающего момента 580 кН·м. Данный результат хорошо коррелируется с результатом, полученным в исследовании [10], где для балок без предварительного напряжения арматуры переход к высокопрочному бетону был целесообразен при достижении нагрузки в 550 кН·м.

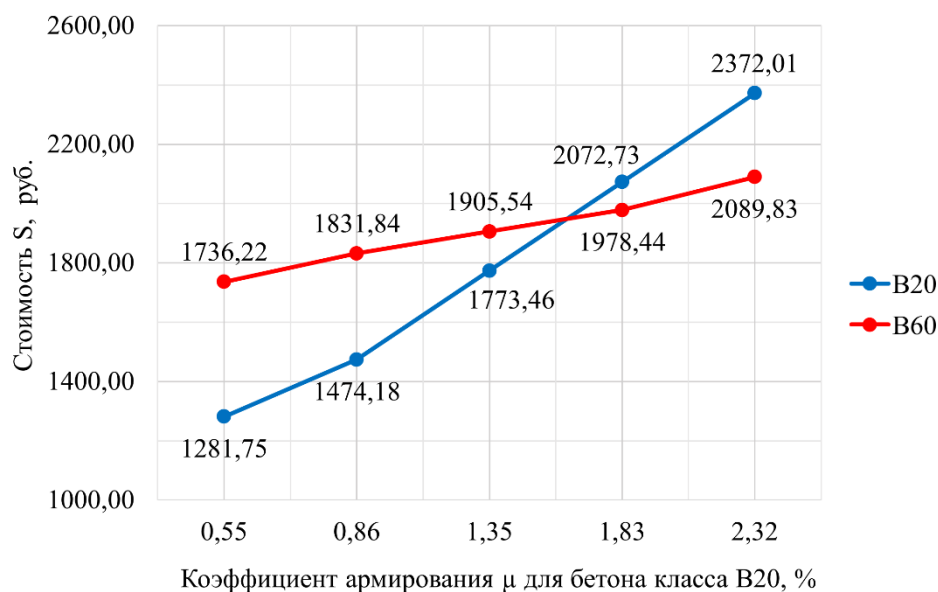


Рис. 3 – График зависимости стоимости 1п.м. балки от коэффициента армирования μ для балки из бетона класса В20

Анализ графика на рис. 3 показывает, что целесообразно изменить класс бетона в балке сечением 30х60 см с В20 на В60 при достижении процентом армирования значения 1,63% и выше. Полученный результат следует также сравнить с результатом, полученным для изгибаемых элементов без предварительного напряжения [9], [10]. В данных исследованиях переход от бетона класса В20 к бетону В60 целесообразен при достижении коэффициента армирования $\mu=2,67-2,8\%$ в балках из бетона В20, что примерно на 1% превышает значение, полученное для предварительно напряженных элементов.

Стоит отметить, что полученные количественные результаты носят временный характер, так как стоимость материалов рассчитана по показателям актуальным на 10.2022.

Заключение

Основываясь на результатах проведенного исследования, можно сформулировать следующие выводы:

1. Анализ результатов расчета балок одинакового поперечного сечения по раскрытию трещин (с учетом обеспечения прочности) выявил, что область эффективного использования высокопрочного бетона в изгибаемых балках с предварительным напряжением арматуры несколько шире, чем аналогичная область для элементов без предварительного напряжения. Так, при предельно допустимой ширине раскрытия трещин 0,2 мм и предварительном напряжении, равном 600 МПа, применение бетона класса В60 оказывается более обоснованным, чем бетона класса В20, при содержании арматуры более 1,63% (для бетона В20).

2. Приведенные рекомендации имеют приблизительный характер, так как окончательная стоимость железобетонных элементов складывается не только из стоимости материалов, но и из транспортных расходов, затрат на производство работ и т.д.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Ткачев Д.В. Высокопрочный бетон в строительстве / Д.В. Ткачев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2021. — С. 1675-1680.
2. Иноземцев А.С. Высокопрочные легкие бетоны – конструкционный бетон нового поколения / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв // Технологии бетонов. — 2014. — № 9(98). — С. 40-44.
3. Иноземцев А.С. Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв // Научно-технический вестник Поволжья. — 2012. — №5. — С. 198-205.
4. Палагин Н.Г. Экономическая целесообразность изготовления многопустотных плит перекрытий из высокопрочного песчаного бетона / Н.Г. Палагин, М.М. Ахметов, А.М. Гридчи [и др.] // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2021. — №4(58). — С. 26-38. — DOI: 10.52409/20731523_2021_4_26
5. Палагин Н.Г. Экономическая эффективность колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного песчаного бетона / Н.Г. Палагин, Г.П. Никитин, А.Н. Трунов // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2022. — №1(59). — С. 41-53. — DOI: 10.52409/20731523_2022_1_41.
6. Головатюк М.А. Эффективность применения высокопрочных бетонов в ростверке свай / М.А. Головатюк // Студенческий вестник. — 2021. — №1-7(146). — С. 16-18.

7. Рогатнев Ю.Ф. Оптимизация параметров поперечного сечения двухслойных изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочным бетоном класса В90 в сжатой зоне / Ю.Ф. Рогатнев, Ж. Минани, О.О. Соколов [и др.] // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. — 2022. — №3(22). — С. 17-27.

8. Страхов Д.А. Изгибаемые элементы из высокопрочного бетона / Д.А. Страхов, Л.Н. Синяков, А.Д. Василенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2018. — №11(74). — С. 7-16. — DOI:10.18720/CUBS

9. Страхов Д.А. Эффективность применения высокопрочного бетона в изгибаемых элементах / Д.А. Страхов, Д.З. Гизатуллина // Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. Часть 2. — 2022. — С. 295-298.

10. Страхов Д.А. Применение высокопрочного бетона в балках прямоугольного сечения / Д.А. Страхов, Д.З. Гизатуллина // Современное строительство и архитектура. — 2022. — №3(27). — С. 44-52. — DOI: 10.18454/mca.2022.27.6

11. Никитин И.К. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СП 52-102-2003) / И.К. Никитин, Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трёкин // ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. — М.: ОАО ЦНИИПромзданий. — 2005. — С.158.

12. Ивлева С.В. Территориальный сборник сметных цен на материалы, изделия и конструкции, применяемые в строительстве. Санкт-Петербург (ТССЦ – 2001) / С.В. Ивлева, Э.Ю. Малов, Д.А. Санько. — М: ООО «Экслибрис Принт». — 2022. — № 130(10). — С. 861.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tkachev D.V. Vysokoprochnyy beton v stroitelstve [High-strength concrete in construction] / D.V. Tkachev // Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova [proceedings of scientific conference International scientific and technical conference of young scientists of BSTU]. — 2021. — P. 1675-1680. [in Russian]

2. Inozemtsev A.S. Vysokoprochnye legkie betony – konstrukcionnyj beton novogo pokoleniya [High-strength lightweight concrete is a structural concrete of new generation] / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev // Tehnologii betonov [Concrete technologies]. — 2014. — №9(98). — P. 40-44. [in Russian]

3. Inozemtsev A.S. Ekonomicheskie predposylki primeneniya vysokoprochnykh legkih betonov [Economic prerequisites for applications of high-strength lightweight concrete] / A.S. Inozemtsev, E.V. Korolev // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region]. — 2012. — №5. — P. 198-205. [in Russian]

4. Palagin N.G. Ekonomicheskaya celesoobraznost' izgotovleniya mnogopustotnykh plit perekrytij iz vysokoprochnogo peschanogo betona [Economic feasibility of manufacturing hollow-core floor slabs from high-strength sand concrete] / N.G. Palagin, M.M. Akhmetov, A.M. Gridchin [et al.] // Izvestija kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. — 2021. — №4(58). — P. 26-38. — DOI: 10.52409/20731523_2021_4_26 [in Russian]

5. Palagin N.G. Ekonomicheskaya effektivnost' kolonn pryamougol'nogo secheniya odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy s mostovymi kranami iz vysokoprochnogo peschanogo betona [Economic efficiency of manufacturing rectangular columns of one-story industrial buildings with overhead cranes from high-strength sand concrete] / N.G. Palagin, G.P. Nikitin, A.N. Trunov // Izvestija kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. — 2022. — №1(59). — P. 41-53. — DOI: 10.52409/20731523_2022_1_41 [in Russian]

6. Golovatjuk M.A. Jefferektivnost' primeneniya vysokoprochnykh betonov v rostverke svaj [The effectiveness of the use of high-strength concrete in the pile grillage] / M.A. Golovatjuk // Studencheskij vestnik [Student Bulletin]. — 2021. — №1-7(146). — P. 16-18. [in Russian]

7. Rogatnev Y.F. Optimizaciya parametrov poperechnogo secheniya dvuhslonnykh izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s vysokoprochnym betonom klassa B90 v szhatoj zone [Optimization of parameters of the cross-section of two-layer bending reinforced concrete elements with high-strength b90 concrete in the compressed zone] / Y.F. Rogatnev, J. Minani, O.O. Sokolov, A.Y. Rogatnev // Zhilishhnoe hozjajstvo i kommunal'naja infrastruktura [Housing and communal infrastructure] — 2022. — №3(22). — P. 17-27. [in Russian]

8. Strahov D.A. Izgibaemye elementy iz vysokoprochnogo betona [High-strength concrete bending elements] / D.A. Strahov, L.N. Sinyakov, A.D. Vasilenko // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2018. — №11(74). — P. 7-16. — DOI:10.18720/CUBS [in Russian]

9. Strakhov D.A. Jefferektivnost' primeneniya vysokoprochnogo betona v izgibaemykh jelementah [The effectiveness of the use of high-strength concrete in bending elements] / D.A. Strakhov, D.Z. Gizatullina // Nedelja nauki ISI. Sbornik materialov Vserossijskoj konferencii. Chast' 2. [Science Week of the Institute of Civil Engineering. Collection of materials of the All-Russian Scientific Conference. Part 2.]. — 2022. — P. 295-298. [in Russian]

10. Strakhov D.A. Primenenie vysokoprochnogo betona v balkah pryamougol'nogo secheniya [The application of high-quality concrete in beams with rectangular sections] / D.A. Strakhov, D.Z. Gizatullina // Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura [Modern construction and architecture]. — 2022. — №3(27). — P. 44-52. — DOI: 10.18454/mca.2022.27.6 [in Russian]

11. Nikitin I.K. Posobie po proektirovaniju predvaritel'no naprjazhennykh zhelezobetonnykh konstrukcij iz tzhelogo betona (k SP 52-102-2003) [Manual on the design of prestressed reinforced concrete structures made of heavy concrete] / I.K. Nikitin, Je.N. Kodys, N.N. Trjokin // CNIIPromzdaniy, NIIZhB. — М.: CNIIPromzdaniy, JSC. — 2005. — P. 158. [in Russian]

12. Ivleva S.V. Territorialnyy sbornik smetnykh tsen na materialy, izdeliya i konstruksii, primenyayemye v stroitelstve. Sankt-Peterburg (TSSTs — 2001) [Territorial collection of estimated prices for materials, products and structures used in construction. St. Petersburg] / S.V. Ivleva, E.Yu. Malov, D.A. Sanko // LLC «Ekslibris Print». — 2022. — № 130(10). — P. 861. [in Russian]