

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2022.27.6>

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА В БАЛКАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Научная статья

Страхов Д.А.¹, Гизатуллина Д.З.²*

¹ ORCID: 0000-0003-2288-6634;

² ORCID: 0000-0001-7386-0878;

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

* Корреспондирующий автор (gizatullina.dz[at]edu.spbstu.ru)

Аннотация

Объектом исследования данной статьи является эффективное применение высокопрочного бетона в балках прямоугольного сечения. Цель работы: выявить область рационального использования высокопрочного бетона по критерию трещиностойкости в изгибаемых элементах. Рассмотрено влияние повышения класса бетона 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. 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 результате исследований была очерчена 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.

THE APPLICATION OF HIGH-QUALITY CONCRETE IN BEAMS WITH RECTANGULAR SECTIONS

Research article

Strakhov D.A.¹, Gizatullina D.Z.²*

¹ ORCID: 0000-0003-2288-6634;

² ORCID: 0000-0001-7386-0878;

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

* Corresponding author (av.erofeev[at]yandex.ru)

Abstract

The research object of this article is the effective use of high-quality concrete in beams with rectangular sections. The aim of the work: to identify the area of effective use of high-quality concrete according to the criterion of crack resistance in bending elements. The influence of increasing the concrete class in calculation of the second group of limit states, namely, in calculation of the crack opening width, is examined. The analysis was made for beams of the same section with a given crack opening width equal to the limit value. In order to achieve the required crack opening width, the required 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.

Введение

Согласно нормативным документам, действующим на территории Российской Федерации, высокопрочным называется бетон, имеющий прочность на сжатие 60 МПа и выше и изготавливаемый из портландцементного клинкера. Бетоны, имеющие высокий класс по прочности, обладают лучшими показателями по критериям прочности, трещиностойкости, ползучести, морозостойкости, водонепроницаемости по отношению к бетону рядовых классов [1], [2], [3]. Смеси высокопрочного бетона имеют способность дольше сохранять свои свойства и позволяют транспортировать материал на удаленные строительные площадки [2]. С целью улучшения свойств бетона проводятся исследования по разработке новых видов высокопрочных композитных материалов, например, рассматривается разработка бетонов на основе вторичного сырья [4], [5], [6], [7].

Высокопрочный бетон успешно занял нишу основного материала, применяющегося при строительстве уникальных зданий и сооружений, имеющих высокую степень ответственности (оболочки АЭС, платформы по добыче нефти и т. д.) [8], [9], [10]. Однако использование бетонов высоких классов по прочности в массовом строительстве ограничивается высокой стоимостью материала [10].

Для внедрения модифицированных бетонных смесей, имеющих высокую прочность на сжатие, существует необходимость научно-технического обоснования экономической и технологической эффективности замены классических материалов высокопрочными. В связи с тем, что высокопрочные бетоны могут воспринять большие нагрузки на сжатие, множество исследований проведено в области внедрения высоких классов бетона в сжатые элементы конструкций. Так же в ряде исследований производится анализ эффективности замены бетонов обычных

классов В20-В30 на высокопрочный [11], [12], [13]. Разумеется, применение высокопрочных бетонов не ограничивается использованием в сжатых элементах. Изучается эффективность работы высокопрочного бетона в изгибаемых элементах. Так, например, в работе [14] очерчена рациональная область применения высокопрочного бетона по критерию прочности в балках постоянного прямоугольного сечения. Тем не менее следует отметить, что в настоящее время количество исследований по эффективному применению высокопрочного бетона в изгибаемых элементах недостаточно, в частности в конкретизации количественных рекомендаций.

Методика расчета ширины раскрытия трещин

Расчет железобетонных элементов по образованию трещин производят по предельным усилиям или на основании нелинейной деформационной модели. Ниже приведен расчет по образованию трещин по предельным усилиям для изгибаемых элементов, согласно которому момент от внешних нагрузок и воздействий в расчетном сечении не должен превышать предельный момент, соответствующий образованию нормальных трещин.

Расчет по раскрытию трещин выполняется из условия, согласно которому ширина раскрытия трещин от внешних нагрузок не должна превышать предельно допустимого значения, которое в рамках настоящего исследования принято равным 0,3 мм при продолжительном раскрытии трещин.

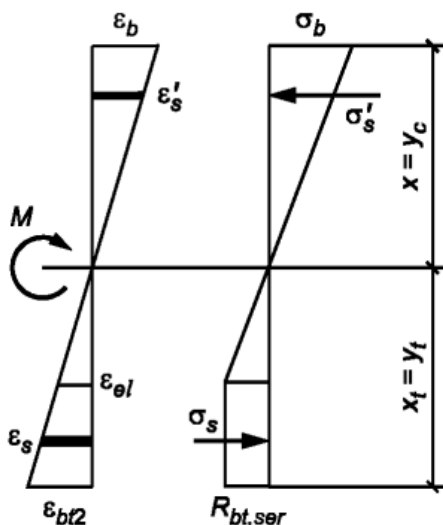


Рис. 1 – Схема напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента при проверке образования трещин

Момент образования трещин определяется по расчетной схеме, приведенной на рис.1, в расчете используются следующие основные параметры и обозначения:

- M – изгибающий момент от внешней нагрузки;
- $y_t = x_t$ – расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента или высота растянутой зоны бетона;
- α – коэффициент приведения арматуры к бетону.

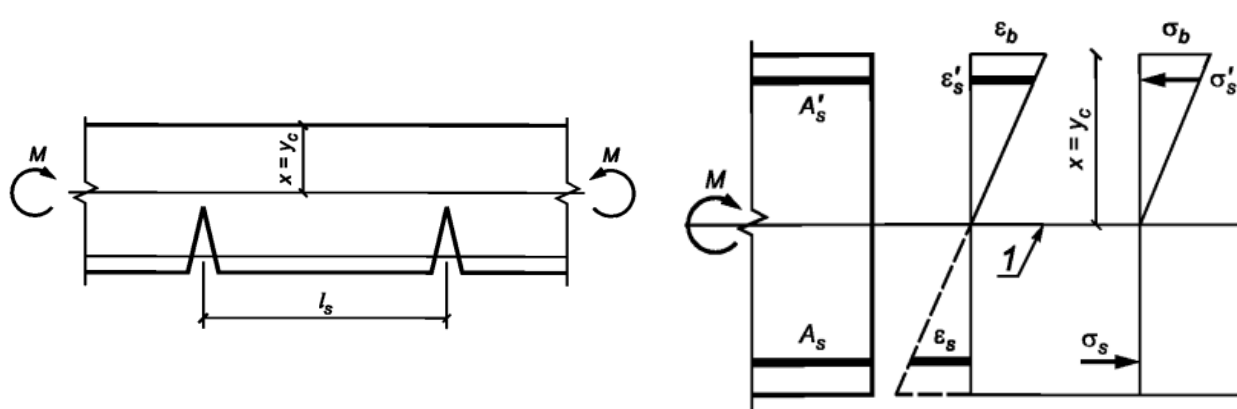


Рис. 2 – Схема напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента с трещинами:
 l – уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

Ширина раскрытия трещин определяется по схеме, приведенной на рис.2., основными параметрами являются:

- σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки;

l_s – расстояние между смежными нормальными трещинами;

E_s – модуль упругости арматуры, для арматуры класса А400 $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа

Ширина раскрытия трещин, согласно действующим нормам, определяется

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

где σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки, определяется по (4);

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

φ_1 – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, для решения данной задачи принимаем $\varphi_1 = 1,4$ для продолжительно действующей нагрузки;

φ_2 – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, $\varphi_2 = 0,5$ для арматуры периодического профиля;

φ_3 – коэффициент, учитывающий характер нагружения, $\varphi_3 = 1,0$ для изгибаемых элементов;

ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами, для изгибаемых элементов допускается определять

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{M} \quad (2)$$

Значения базового расстояния между трещинами определяется

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

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

где A_s – площадь сечения растянутой арматуры;

d_s – номинальный диаметр арматуры;

A_{bt} – площадь растянутого бетона, определяемая по высоте растянутой зоны бетона x_t , определяемая согласно расчетной схеме, приведенной на рис.1. При этом x_t принимают не менее $2a$ и не более $0,5h$.

Напряжения в растянутой арматуре определяют как:

$$\sigma_s = \frac{M \cdot (h_0 - y_c)}{I_{red}} \cdot \alpha_{s1} \quad (4)$$

где I_{red}, y_c – момент инерции и высота сжатой зоны бетона приведенного поперечного сечения элемента, определяемые с учетом только сжатой зоны бетона, расчет производится согласно расчетной схеме, показанной на рис.2;

α_{s1} – коэффициент приведения арматуры к бетону

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}} \quad (5)$$

где $E_{b,red}$ – приведенный модуль деформации сжатого бетона, учитывающий неупругие деформации; значения модуля для бетона каждого класса приведены в таблице 2.

Критерии оценки эффективности применения высокопрочного бетона

В качестве критерия оценки эффективности применения высокопрочного бетона в изгибаемых элементах (балках постоянного поперечного сечения) принята минимальная общая стоимость материалов (бетона и арматуры) одного погонного метра балки при фиксированной ширине раскрытия трещин и различной величине изгибающих моментов.

Стоимость 1 п.м. балки была рассчитана по сборнику ТССЦ-2001 в г. Санкт-Петербург, исходя из сметной стоимости материалов без учета НДС. С целью сопоставить расчеты стоимости с результатами работы [14] были использованы цены по состоянию на ноябрь 2018 г. [15].

(Стоимость 1 кубометра бетона и 1 тонны арматуры была назначена директивно на основе анализа рынка. Расчеты проводились на примере соотношения рыночных цен на сталь и бетон в условиях Российской Федерации по состоянию на ноябрь 2018 г. [15]. Методология расчетов можно считать универсальной, поэтому результаты могут быть использованы в странах с аналогичным соотношением рыночных цен на сталь и бетон.)

Основные результаты

Для иллюстрации, приведенной выше методики, приводятся результаты расчета раскрытия трещин на примере балок постоянного сечения (табл.1), имеющих различные коэффициенты армирования, удовлетворяющие условию, что раскрытие трещин в элементе равно предельному значению 0,3 мм. Размеры сечения балок приняты в соответствии с [14] для удобства сопоставления результатов эффективности применения высокопрочного бетона исходя из условий прочности и трещиностойкости.

Принята арматура класса А400 диаметром 28 мм с модулем упругости $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа. Минимальная площадь растянутой и сжатой арматуры принимается по условию прочности исходя из данных, приведённых в [14]. Для сопоставления результатов исследований за расчетные моменты приняты моменты по таблице 6 [14].

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	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}	
E_s , МПа					α
$2 \cdot 10^5$	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	

Результаты подбора площадей растянутой арматуры при заданных расчетных моментах и ширине раскрытия трещин, равной 0,3 мм, а также общие проценты армирования сечений приведены в таблице 4. Площадь сжатой арматуры назначена по условию прочности с целью не допустить «переармирования» элементов с одиночной арматурой.

Для расчета стоимости 1 п.м. балки были использованы сметные сборники [15]. Стоимость арматурной стали горячекатаной по ГОСТ 5781-82 была рассчитана как среднее значение стоимости 1 т арматуры класса АIII(А400) и составила 38310,13 руб. [15].

Стоимость бетона на 1 п.м. балки была рассчитана по [15]. Данные для расчета стоимости балки из бетона В20 взяты по коду ресурса 401–0007, для В60 – 401–0217. 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 1 м ³ , руб.	Стоимость 1 п.м., руб.
		для балки постоянного поперечного сечения 30x60, см
В20	3812,93	686,33
В60	5429,14	977,25

Данные по расчету стоимости S погонного метра балок приведены в таблице 4. В таблице коэффициент армирования μ рассчитан как отношение площади сечения арматуры к рабочему сечению бетона. В случаях, когда в сечении присутствует сжатая арматура, при расчете коэффициента μ учитывается сумма площадей поперечных сечений сжатой и растянутой арматуры.

Таблица 4 – Результаты анализа

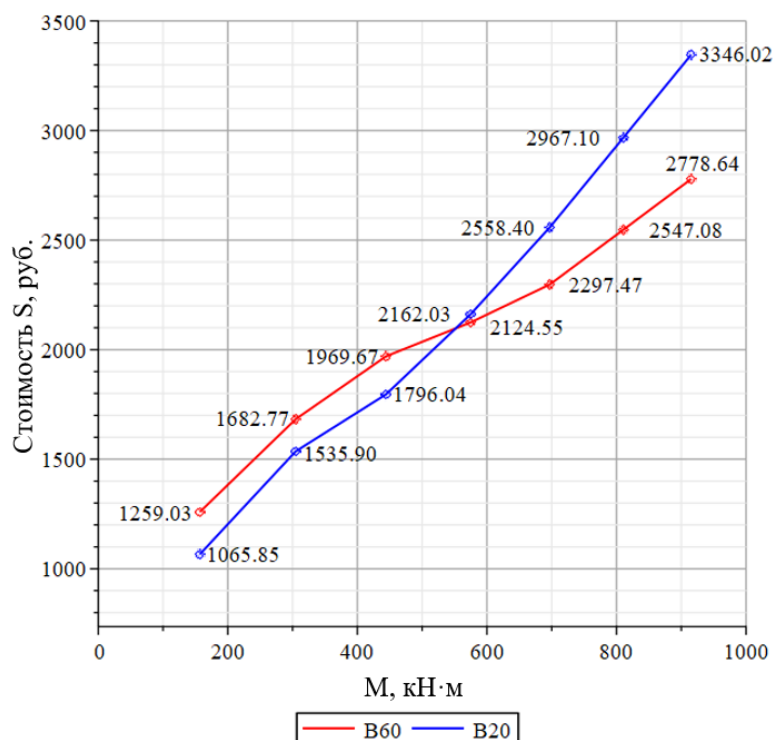
M , кН·м	Класс бетона	M_{cre} , кН·м	A_s , см ²	A'_s , см ²	$A_s + A'_s$, см ²	μ , %	S , руб.	a_{cre} , мм
156,75	B20	36,25	12,62	–	12,62	0,76	1065,85	0,3
	B60	69,28	9,37	–	9,37	0,57	1259,03	
304,83	B20	41,91	28,25	–	28,25	1,71	1535,90	
	B60	76,6	23,46	–	23,46	1,42	1682,77	
444,25	B20	44,68	34,8	2,1	36,9	2,24	1796,04	
	B60	81,51	33,0	–	33,0	2,00	1969,67	
575,01	B20	47,88	39,6	9,47	49,07	2,97	2162,03	
	B60	84,14	38,15	–	38,15	2,31	2124,55	
697,1	B20	51,49	45,9	16,35	62,25	3,77	2558,40	
	B60	87,06	43,9	–	43,9	2,66	2297,47	
810,53	B20	55,33	53,1	22,74	75,84	4,60	2967,10	
	B60	91,25	52,2	–	52,2	3,16	2547,08	
915,3	B20	58,58	59,8	28,64	88,44	5,36	3346,02	
	B60	95,11	59,9	–	59,9	3,63	2778,64	

Результаты расчетов по ширине раскрытия трещин показывают, что использование высокопрочного бетона при малых процентах армирования экономически невыгодно.

Так, при одинаковом раскрытии трещин и одинаковой несущей способности балки заданных параметров ($b = 30$ см, $h = 60$ см, $h_0 = 55$ см) при коэффициентах армирования менее 1% использование бетона класса B20 примерно на 15% выгоднее, чем использование бетона марки B60.

Однако при достижении расчетного момента равного приблизительно 550 кН·м и приближении коэффициента армирования балки из бетона B20 к 3%, использование бетона класса B60 становится экономически эффективнее.

Чтобы наглядно представить результаты расчета, приведены графики зависимости стоимости погонного метра балки рассматриваемого сечения от расчетного момента и коэффициента армирования для балки из бетона B20 (рисунки 3 и 4).

Рис. 3 – График зависимости стоимости 1 п.м. балки от расчетного момента M при классах бетона B20 и B60

Анализ графика на рис.3 показывает, что при увеличении изгибающего момента стоимость погонного метра балки сечением 30х60 см из бетона класса В60 становится ниже стоимости аналогичной балки из бетона В20. При достижении нагрузки, соответствующей значению момента 550 кН·м целесообразен переход на высокопрочный бетон.



Рис. 4 – График зависимости стоимости 1п.м. балки от коэффициента армирования μ для балки из бетона класса В20

Анализ графика на рис. 4 показывает, что при процентах армирования примерно 2,8% и выше в балке сечением 30х60 см из бетона класса В20 целесообразен переход к высокопрочному бетону класса В60. Расчеты свидетельствуют, что этот результат характерен и для других часто используемых размеров сечения балок, в которых высота сечения в два-три раза больше ширины.

Целесообразно проанализировать результаты данного исследования совместно с данными [14], для чего на рис.5 совмещены графики зависимости стоимости погонного метра балки, имеющей размеры поперечного сечения 30х60 см, по критериям прочности и трещиностойкости.

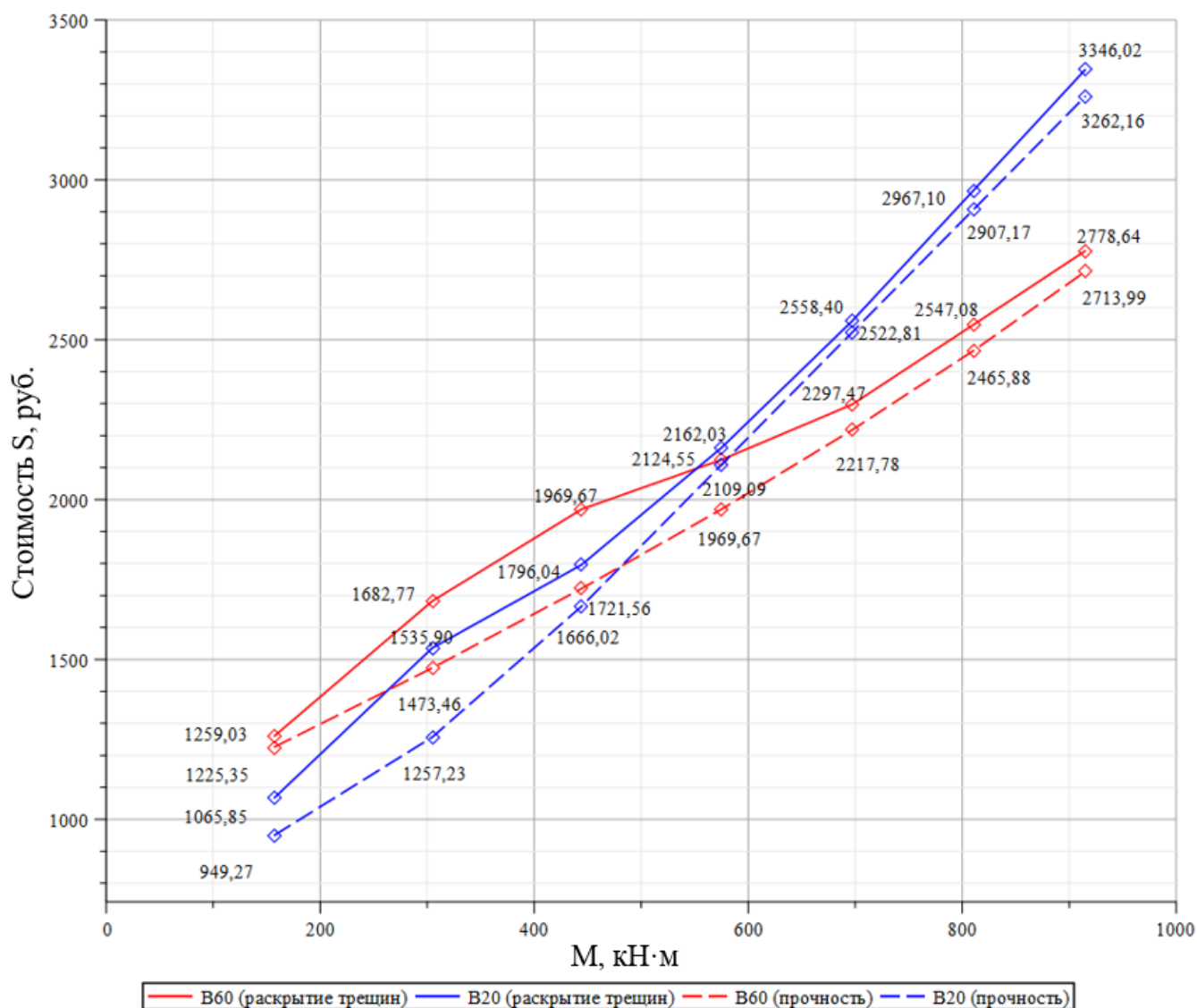


Рис. 5 – График зависимостей стоимости бетона от предельного момента по критериям прочности и ограничения ширины раскрытия трещин

Анализ представленных на рисунке 5 данных показывает, что оценка эффективного применения высокопрочного бетона по критерию прочности должна быть дополнена расчетом, учитывающим ширину раскрытия трещин. Область эффективного применения высокопрочного бетона смещается в сторону увеличения изгибающих моментов и количества арматуры. Изгибающий момент, при котором целесообразно перейти на класс бетона В60, увеличивается примерно на 100 кН·м. Результаты исследования [14] указывают на рациональность перехода с бетона класса В20 на бетон класса В60 при достижении процента армирования в балке из бетона В20 около $\mu = 2,3\%$, учет ширины раскрытия трещин приводит к увеличению процента армирования до значения $\mu = 2,8\%$.

Следует отметить, что конкретные количественные результаты исследования носят временный характер: цены на материалы использованы по показателям на 11.2018. Анализ данных сметных сборников от 11.2018 и 11.2021 показывает, что за промежуток времени в 3 года стоимость бетона и арматурной стали увеличилась непропорционально. Стоимость арматурной стали увеличилась в 1,65 раз, а стоимость бетона марок В20 и В60 в 1,09 и 1,18 раз соответственно [16], из чего следует, что область применения высокопрочного бетона может быть расширена, так как большая часть стоимости погонного метра балки зависит именно от стоимости арматуры, количество которой в значительной степени сокращается при применении высоких классов бетона.

Заключение

По результатам проведенного исследования могут быть сформулированы следующие выводы:

1. Подтверждены результаты расчета эффективности применения высокопрочного бетона для изгибаемых элементов прямоугольного поперечного сечения, в которых арматура подобрана из условия прочности [14]. Так, для наиболее часто используемых размеров сечения балок (высота сечения в два – три раза больше ширины) экономическая целесообразность применения бетона высокой прочности имеет место при процентах армирования, превышающих величину 2,2–2,3% (для бетона класса В20).

2. В результате анализа расчетов балок аналогичного поперечного сечения по раскрытию трещин установлено, что область эффективного использования высокопрочного бетона является более узкой, чем при расчетах по прочности.

При предельно допустимой ширине раскрытия трещин 0,3 мм применение бетона класса В60 оказывается более обоснованным, чем бетона класса В20, при содержании арматуры более 2,8–2,9% (для бетона В20).

3. В последнее время стоимость стальной арматуры увеличивается более интенсивно, чем стоимость бетона. Поэтому область эффективного использования высокопрочного бетона в изгибаемых элементах имеет тенденцию к расширению.

4. Разумеется, приведенные рекомендации имеют приблизительный характер, так как на окончательную стоимость железобетонных элементов кроме цены материалов влияют и другие факторы: транспортные расходы, стоимость рабочей силы и т. д.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Кондратьев Е.А. Сравнительный анализ высокопрочных и общестроительных бетонов / Е.А. Кондратьев, Н.Е. Клименко // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 75-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2019 год. – 2020 – с.535–538.
2. Солонов Г.Г. Особенности высокопрочного бетона / Г.Г. Солонов, А.В. Печеникин, М.О. Артеменко // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXX Международной научно-практической конференции – 2020 – с.273–275.
3. Кононова И.Е. Анализ прочностных свойств высокопрочного бетона в строительстве / И.Е. Кононова // V международный студенческий строительный форум – 2020 – с.199–204.
4. Naik T.R. Development of high-strength, economical self-consolidating concrete. / T.R. Naik, R. Kumar, B.W. Ramme et al. // Construction and Building Materials. – 2012. – 30. – pp. 463–469. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.025.
5. Velichko E.G. Problems and prospects of self-compacting concrete mixes for high-strength concrete. / E.G. Velichko // International conference on materials physics, building structures and technologies in construction, industrial and production engineering. – 2020. DOI: 10.1088/1757–899X/896/1/012090.
6. Nehar K.C. Experimental study and modeling of the mechanical behavior of recycled aggregates-based high-strength concrete. / K.C. Nehar, D. Benamara // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2021. – № 56(15). – pp. 203–216. DOI:10.3221/IGF–ESIS.56.17.
7. Inozemtcev A.S. Case Studies of High-strength Lightweight Concrete Using Expanded Siliceous Aggregate. / A.S. Inozemtcev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 1(840). DOI: 10.1088/1757–899X/840/1/012017.
8. Болдов С.Е. Высокопрочные легкие бетоны, применение в строительстве / С.Е. Болдов, С.В. Каретникова // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Под редакцией А.А. Бакулина – 2020 – с.213–216.
9. Сальникова А.С. Высокопрочный бетон: от фундаментальных до прикладных задач / А.С. Сальникова // Университетская наука – 2020 – №2(10) – с.118–120.
10. 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.
11. Корякина Е.Е. Об эффективности использования высокопрочного бетона в сжатых элементах высотных зданий / Е.Е. Корякина // Современные наукоемкие технологии – 2016 – №2-1 – с.23–26.
12. Синицин Д.А. Высокоэффективные бетоны нового поколения при строительстве зданий повышенной этажности в Республике Башкортостан / Д.А. Синицин, А.С. Салов, И.Г. Терехов и др. // Строительные материалы – 2020 – №6 – с.8–12. DOI:10.31659/0585–430X–2020–781–6–8–12.
13. Дмитренко Е.А. Оценка эффективности применения высокопрочного бетона на примере железобетонных конструкций каркасного здания / Е.А. Дмитренко, Т.О. Гранина, В.Р. Демерза // Вестник донбасской национальной академии строительства и архитектуры – 2020 – №3(137) – с. 5–12.
14. 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.
15. 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 // М.: ООО «РЕАРТ» – 2018 – № 83(11) – с. 942.
16. 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 // М.: ООО «Экслибрис Принт» – 2021 – № 119(11) – с. 860.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kondratyev E.A. Sravnitel'nyj analiz vysokoprochnyh i obshchestroitel'nyh betonov [Comparative analysis of high-strength and general construction concrete] / E.A. Kondratyev, N.E. Klimenko // Nauchnoye obespecheniye agropromyshlennogo kompleksa [Proceedings of scientific conference Scientific support of the agro-industrial complex]. – 2020 – pp. 535–538. [in Russian]
2. Solonov G.G. Osobennosti vysokoprochnogo betona [Features of high-strength concrete] / G.G. Solonov, A.V. Pechenikin, M.O. Artemenko // Fundamentalnyye i prikladnyye nauchnyye issledovaniya: aktualnyye voprosy, dostizheniya i innovatsii [Proceedings of scientific conference Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations] – 2020 – pp. 273–275. [in Russian]

3. Kononova I.E. Analiz prochnostnykh svoystv vysokoprochnogo betona v stroitelstve [Analysis of strength properties of high-strength concrete in construction] / I.E. Kononova // V mezhdunarodnyy studencheskiy stroitelnyy forum [Proceedings of scientific conference V International Student Construction Forum] – 2020 – pp.199–204. [in Russian]
4. Naik T.R. Development of high-strength, economical self-consolidating concrete / T.R. Naik, R. Kumar, B.W. Ramme et al. // Construction and Building Materials. – 2012. – 30. – p. 463–469. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.025.
5. Velichko E.G. Problems and prospects of self-compacting concrete mixes for high-strength concrete. / E.G. Velichko // International conference on materials physics, building structures and technologies in construction, industrial and production engineering. – 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012090.
6. Nehar K.C. Experimental study and modeling of the mechanical behavior of recycled aggregates-based high-strength concrete. / K.C. Nehar, D. Benamara // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2021. – № 56(15). – pp. 203–216. DOI:10.3221/IGF-ESIS.56.17.
7. Inozemtcev A.S. Case Studies of High-strength Lightweight Concrete Using Expanded Siliceous Aggregate. / A.S. Inozemtcev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 1(840). DOI: 10.1088/1757-899X/840/1/012017.
8. Boldov S.E. Vysokoprochnyye legkiye betony, primeneniye v stroitelstve [High-strength lightweight concretes, application in construction] / S.E. Boldov, S.V. Karetnikova // Novyye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve [Proceedings of scientific conference New technologies in the educational process and production] – 2020 – pp.213–216. [in Russian]
9. Salnikova A.S. Vysokoprochnyy beton: ot fundamental'nykh do prikladnykh zadach [High-strength concrete: from fundamental to applied tasks] / A.S. Salnikova // Universitetskaya nauka [University Science]. – 2020 – №2(10) – pp.118–120. [in Russian]
10. Tkachev D.V. Vysokoprochnyy beton v stroitelstve [High-strength concrete in construction] / D.V. Tkachev // Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova [Proceedings of scientific conference International scientific and technical conference of young scientists of BSTU]. – 2021 – pp. 1675–1680. [in Russian]
11. Koryakina E.E. Ob effektivnosti ispol'zovaniya vysokoprochnogo betona v szhatykh elementakh vysotnykh zdaniy [About efficiency of high-strength concrete in compressed elements of high-rise buildings] / E.E. Koryakina // Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii [Modern high-tech technologies]. – 2016 – №2-1 – pp. 23–26. [in Russian]
12. Sinitsin D.A. Vysokoeffektivnyye betony novogo pokoleniya pri stroitel'stve zdaniy povyshennoj etazhnosti v Respublike Bashkortostan [Highly efficient new generation concretes in the construction of high-rise buildings in the republic of Bashkortostan] / D.A. Sinitsin, A.S. Salov, I.G. Terekhov et al. // Stroitelnyye materialy [Building materials]. – 2020 – №6 – pp. 8–12. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-8-12. [in Russian]
13. Dmitrenko E.A. Ocenka effektivnosti primeneniya vysokoprochnogo betona na primere zhelezobetonnykh konstruktsiy karkasnogo zdaniya [The evaluation of the effectiveness of the use of high-strength concrete on the example of reinforced concrete structures of a frame building] / E.A. Dmitrenko, T.O. Granina, V.R. Demerza // Vestnik donbasskoy natsionalnoy akademii stroitelstva i arkhitektury [Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture]. – 2020 – №3(137) – pp. 5–12. [in Russian]
14. Strahov D.A. Izgibaemye elementy iz vysokoprochnogo betona [High-strength concrete bending elements] / D.A. Strahov, L.N. Sinyakov, A.D. Vasilenko // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij [Construction of Unique Buildings and Structures] – 2018 – №11(74) – pp. 7–16. DOI:10.18720/CUBS. [in Russian]
15. Ivleva S.V. Territorialnyy sbornik smetnykh tsen na materialy, izdeliya i konstruktsii, primenyayemyye v stroitelstve. Sankt-Peterburg. (TSSTs – 2001) [Territorial collection of estimated prices for materials, products and structures used in construction. Saint-Petersburg]. / S.V. Ivleva, E.Yu. Malov // LLC «REART» – 2018 – № 83(11) – p. 942. [in Russian]
16. Ivleva S.V. Territorialnyy sbornik smetnykh tsen na materialy, izdeliya i konstruktsii, primenyayemyye 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 // LLC «Ekslibris Print» – 2021 – № 119(11) – p. 860. [in Russian]