



Влияние рецептурных факторов на прочностные свойства тяжелых сталефибробетонов

© Ю.В. Жеребцов, Д.М. Ельшаева, Ю.Н. Лухнёва, Н.А. Доценко,
М.С. Самофалова, П.Р. Курасанов, А.А. Фаталиев

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Резюме: На сегодняшний день стальная фибра является одним из наиболее перспективных компонентов, применяемых при производстве фибробетонов. С целью улучшения прочностных свойств тяжелых сталефибробетонов было изучено влияние на эти свойства рецептурных факторов, а именно процента фибрового армирования и длины волокон фибры. Всего было изготовлено и испытано 18 серий базовых образцов стандартного размера: 27 кубов с размерами 100x100x100 мм для испытаний на сжатие; 27 призм с размерами 100x100x400 мм для испытаний на растяжение при изгибе. Были проведены расчеты прочностных характеристик в зависимости от рецептурных факторов, расчеты производились методом математического планирования эксперимента (полнофакторный эксперимент – ПФЭ 2^k). На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным будет применение стальной фибры с длиной волокон 30 мм и проценте объемного армирования 1,5%.

Ключевые слова: фибра, стальные волокна, фиброволокно, фибровое армирование, сталефибробетон, прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, плотность, морозостойкость

Для цитирования: Жеребцов Ю.В., Ельшаева Д.М., Лухнёва Ю.Н., Доценко Н.А., Самофалова М.С., Курасанов П.Р. и др. Влияние рецептурных факторов на прочностные свойства тяжелых сталефибробетонов. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 2. С. 250–259. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-250-259>

Effect of recipe factors on mechanical properties of heavyweight steel fibre reinforced concrete

Yuriy V. Zherebtsov, Diana M. El'shaeva, Yuliya N. Lukhneva, Natal'ya A. Dotsenko,
Mariya S. Samofalova, Pavel R. Kurasanov, Asif A. Fataliev
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract: Today, steel fibre is one of the most promising components used to produce fibre reinforced concrete. To improve the mechanical properties of heavyweight steel fibre reinforced concrete, the influence of recipe factors, namely the percentage of fibre reinforcement and the fibre length, on these properties was studied. 18 series of reference samples of a standard size were manufactured and tested: 27 cubes with dimensions of 100x100x100 mm for compression tests and 27 prisms with dimensions of 100x100x400 mm for bending under tension test. We calculated mechanical strength characteristics depending on the recipe factor. The calculations were performed using a numerical experimental design (full factorial experiment 2^k). Based on the obtained results, it can be concluded that the utilisation of steel fibre with a fibre length of 30 mm or the percentage of three-dimensional reinforcement of 1.5% is the most effective.

Keywords: fiber, steel fibers, fiberglass, fiber reinforcement, steel fiber concrete, compressive strength, flexural tensile strength, density, frost resistance

For citation: Zherebtsov YuV, El'shaeva DM, Lukhneva YuN, Dotsenko ND, Samofalova MS, Kurasanov PR, et al. Effect of recipe factors on mechanical properties of heavyweight steel fibre reinforced concrete. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost* = *Proceedings of*

Введение

Основываясь на данных мировой строительной практики и опыте таких развитых стран, как США, Япония, Германия, Италия, Великобритания, можно отметить, что фибробетон считается одним из наиболее перспективных строительных материалов нашего столетия [1].

За рубежом фибробетоны нашли наиболее широкое применение в строительстве жилых и промышленных зданий в сейсмоопасных районах, морских газонефтедобывающих платформ, автодорог, туннелей, плотин и дамб [2–4].

Для повышения прочностных характеристик фибробетонов, оптимизации процесса приготовления фибробетонной смеси и способов ее укладки важно классифицировать применяемую стальную фибру по физико-механическим и геометрическим параметрам (длина волокна, диаметр, прочность волокна на растяжение). Жесткость является одной из наиболее важных характеристик фибры, определяется модулем упругости E_f . По модулю упругости всю фибру делят на 2 группы: 1) высокомодульная фибра $E_f = (70–250) \cdot 10^3$ МПа, к данной группе относится стальная и неметаллическая фибра (базальтовая, асбестовая, стеклянная, углеродная и так далее); 2) низкоомодульная фибра $E_f = (2–10) \cdot 10^3$ МПа. Применение высокоомодульной фибры способствует значительному повышению прочности и трещиностойкости фибробетона, также повышенной ударной стойкости, истираемости, водонепроницаемости и морозостойкости. Низкоомодульная фибра оказывает минимальное влияние на прочностные характеристики, однако способствует повышению морозостойкости, ударной вязкости и снижению усадки¹ [2, 3, 5].

В технологии производства наиболее весомое значение имеет равномерность распределения фиброволокон по всему объёму бетонной смеси. Так, при традиционных методах перемешивания наблюдается скопление волокон в виде комков (ежей). Чтобы обеспечить более равномерное распределение фиброволокон по всему объёму необходимо учитывать длину волокон, процент их содержания, размеры крупного заполни-

теля и способ перемешивания. Для приготовления фибробетонных смесей наиболее эффективным будет применение турбулентных и спирально-вихревых смесителей [6–8].

Еще одной важной проблемой фибробетонных смесей является сниженная удобоукладываемость, поэтому для достижения необходимой удобоукладываемости прибегают к применению пластифицирующих добавок и увеличению водоцементного отношения (В/Ц).

Что касается сталефибробетона, то на сегодняшний день он имеет широкую сферу применения. Сталефибробетоны имеют ряд достоинств: более высокие показатели прочности на сжатие, на растяжение при изгибе, по предельным деформациям при осевом сжатии и растяжении, модулю упругости, трещиностойкости [9–11].

Технология производства стальной фибры зависит от требуемого диаметра (толщины) волокна. Выделяют механический и электромеханический способы изготовления волокон, а также формование из расплава. Среди механических способов производства стальной фибры наиболее широкое распространение получили такие, как волочение, экструдирование стального расплава, фрезерование стального сляба, протяжка и резка стальной фольги и проволоки [12–15].

Целью исследования является изучение основных прочностных характеристик сталефибробетона (прочность на сжатие и прочность на растяжение при изгибе) в зависимости от изменения рецептурных факторов, а именно длины стальных фиброволокон и процента фибрового армирования.

Методы

В данном исследовании была применена стальная фибра, основные физико-механические характеристики которой представлены в табл. 1.

Всего было изготовлено и испытано 18 серий базовых образцов стандартного размера:

– 27 кубов с размерами 100x100x100 мм для испытаний на сжатие;

– 27 призм с размерами 100x100x400 мм для испытаний на растяжение при изгибе;

Все образцы были изготовлены из бетона с одинаковым составом, расход материалов на 1 м³ составил: Ц = 315 кг, Щ = 1205 кг, П = 689 кг, В = 190 л.

¹Стерин В.С. Промышленная технология дисперсно-армированных железобетонных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. СПб, 2002. 33 с.;
Ивлев В.А. Фибробетон в тонкостенных изделиях кольцевой конфигурации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Уфа, 2009. 167 с.

Таблица 1. Физико-механические характеристики фибры
Table 1. Physical and mechanical characteristics of fiber

Толщина стальных фиброволокон, мм	Ширина стальных фиброволокон, мм	Длина стальных фиброволокон, мм	Временное сопротивление стальных фиброволокон растяжению, МПа, не менее	Модуль упругости стальных фиброволокон, МПа
0,3	0,5	20	460	$2,1 \cdot 10^5$
		25		
		30		

Для исследований было применено технологическое оборудование (бетоносмеситель лабораторный БЛ-10), средства измерений (весы лабораторные и линейки) и испытательное оборудование (пресс гидравлический). Испытания на сжатие и растяжение при изгибе проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 10180 [16–20].

Также были проведены расчеты прочностных характеристик сталефибробетона в зависимости от рецептурных факторов. Расчеты осуществлялись методом математического планирования эксперимента (полнофакторный эксперимент – ПФЭ 2^k) с использованием программы *MathCAD*. Длина стальных фиброволокон изменялась в следующих пределах: 20 мм, 25 мм, 30 мм. Процент фибрового армирования изменялся от 0,5 до 1,5 % с интервалом варьирования 0,5.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований влияния рецептурных факторов на прочностные характеристики сталефибробетона представлены в табл. 2 и на рис. 1 и 2.

Определение прочностных характеристик сталефибробетона произведено с помощью регрессионных зависимостей, вид и значения коэффициентов которых устанавливаются методами математического планирования эксперимента.

В качестве функций примем изменяющиеся из-за рецептурных факторов прочностные характеристики сталефибробетона.

В качестве же аргументов примем рецептурные факторы (процент фибрового армирования; длина волокон стальной фибры) в абсолютных показателях с различными уровнями варьирования.

За функцию отклика были приняты параметры:

– $R_{сж}(\mu, l)$ – прочность на сжатие, МПа;

– $R_{изг}(\mu, l)$ – прочность на растяжение при изгибе, МПа.

Данные значения факторов варьирования ПФЭ 2^k представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены расчетные коэффициенты уравнений регрессии для опытных образцов.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований влияния рецептурных факторов на прочностные характеристики сталефибробетона

Table 2. Results of experimental studies of the influence of recipe factors on the strength of characteristics of steel fiber reinforced concrete

Номер опыта	Армирование стальной фиброй (μ), %	Длина волокон стальной фибры (l), мм	Прочность сталефибробетона на сжатие ($R_{сж}$), МПа	Прочность сталефибробетона на растяжение при изгибе ($R_{изг}$), МПа
1	0,5	20	59,8	7,2
2	1,5	20	67,1	8,1
3	0,5	30	63,8	7,7
4	1,5	30	70,8	8,5
5	0,5	25	62,7	7,5
6	1,5	25	69,6	8,3
7	1	20	64,3	7,7
8	1	30	68,8	8,2
9	1	25	67,5	8,1

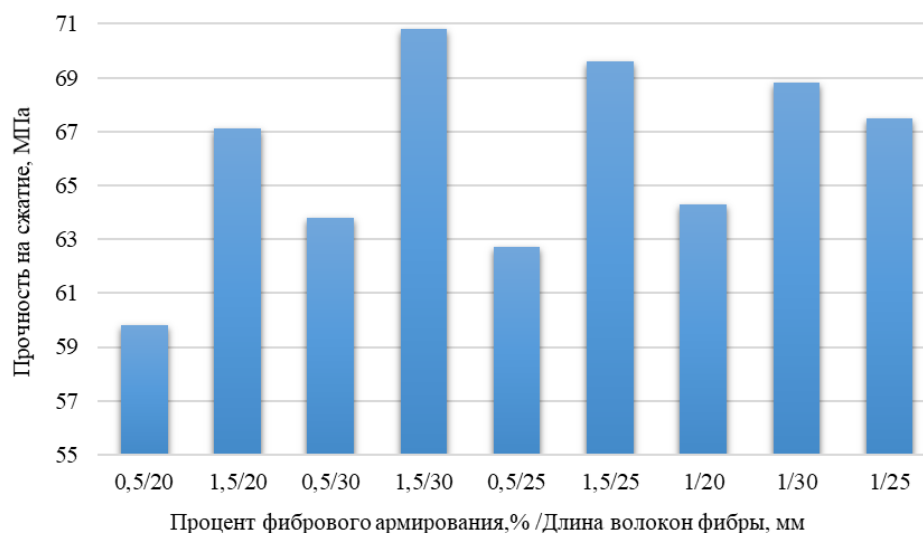


Рис. 1. Зависимость прочности сталефибробетона на сжатие от процента фибрового армирования и длины стальных волокон

Fig. 1. Compressive strength of steel fiber reinforced concrete versus the percentage of fiber reinforcement and the length of steel fibers

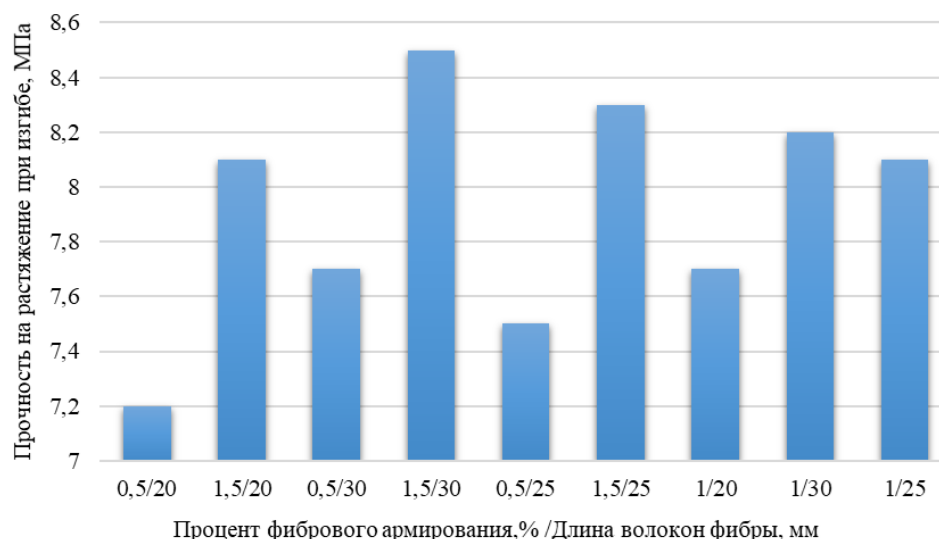


Рис. 2. Зависимость прочности сталефибробетона на растяжение при изгибе от процента фибрового армирования и длины стальных волокон

Fig. 2. Dependence of the tensile strength of steel fiber reinforced concrete in bending on the percentage of fiber reinforcement and the length of steel fibers

Таблица 3. Значения факторов варьирования ПФЭ 2^к

Table 3. The values of the factors of variation of the PFE 2^k

№ п/п	Рецептурные факторы	Уровни фактора		
		минимальный	нулевой	максимальный
1	Армирование стальной фиброй (μ), %	0,5	1	1,5
2	Длина волокон стальной фибры (l), мм	20	25	30

Таблица 4. Расчетные коэффициенты уравнений регрессии для опытных образцов сталефибробетона

Table 4. Calculated coefficients of regression equations for prototypes of steel fiber reinforced concrete

Характеристики	R_0	μ	l	$\mu \cdot l$	μ^2	l^2
Прочность на сжатие, МПа	66,04	0,3927	0,226	-0,15	-0,4145	0,2811
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	7,92	0,0463	0,0259	-0,05	-0,0393	-0,0226

По результатам исследования методом наименьших квадратов были получены базовые уравнения регрессии, которые пред-

$$R_{сж}(\mu; l) = 66,04 + 0,3927 \cdot \mu + 0,226 \cdot l - 0,15 \cdot \mu \cdot l - 0,4145 \cdot \mu^2 + 0,2811 \cdot l^2;$$

$$R_{изг}(\mu; l) = 7,92 + 0,0463 \cdot \mu + 0,0259 \cdot l - 0,05 \cdot \mu \cdot l - 0,0393 \cdot \mu^2 - 0,0226 \cdot l^2.$$

Графическая интерпретация математических зависимостей представлена на рис. 3 и 4. По результатам экспериментальных исследований прочностных характеристик ста-

ставлены в виде полиномов 2-ой степени:

лефибробетона были получены их значения в зависимости от влияния длины стальных фиброволокон и процента фибрового армирования.

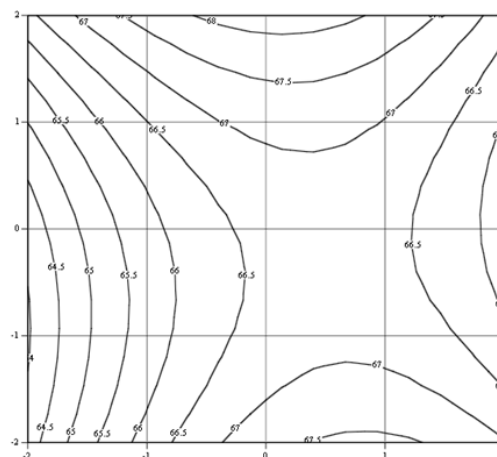
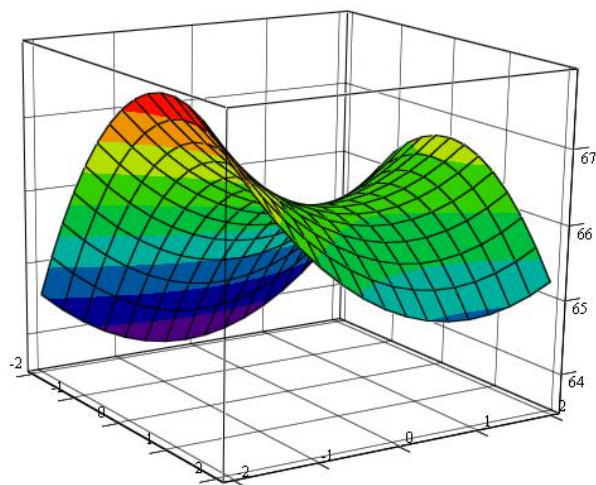


Рис. 3. Графическая зависимость изменения прочности сталефибробетона на сжатие от процента фибрового армирования и длины стальных волокон

Fig. 3. Graphical dependence of the change in the compressive strength of steel fiber reinforced concrete on the percentage of fiber reinforcement and the length of steel fibers

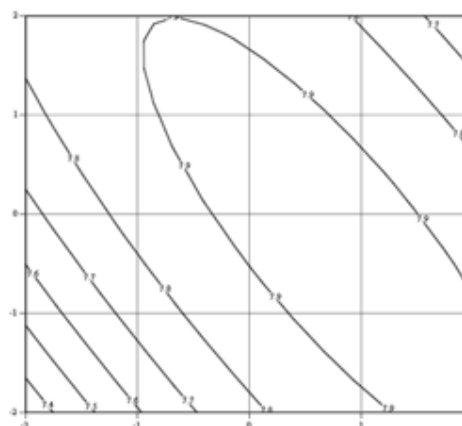
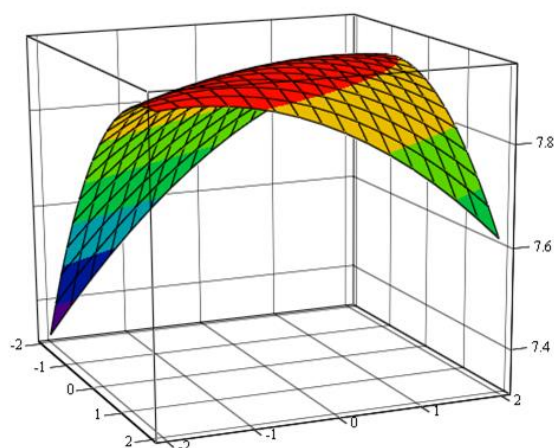


Рис. 4. Графическая зависимость изменения прочности сталефибробетона на растяжение при изгибе от процента фибрового армирования и длины стальных волокон

Fig. 4. Graphical dependence of the change in the tensile strength of steel fiber reinforced concrete during bending on the percentage of fiber reinforcement and the length of steel fibers

Как видно на рис. 1 и 2, максимальные значения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе достигаются при проценте фибрового армирования стальной фиброй, равном 1,5 %, и длине стальной фибры, равной 30 мм.

Полученные в ходе расчетов полиномиальные уравнения регрессии оценивали по значимости коэффициентов, среднеквадратичному отклонению, также с помощью критерия Фишера была проведена оценка адекватности.

Закключение

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным будет применение стальной фибры с длиной волокон 30 мм при проценте фибрового армирования 1,5 %.

Полученные результаты показывают перспективность и целесообразность проведенных исследований, а данные о прочностных свойствах тяжелых сталефибробетонов расширяют информационную базу проектирования бетонов данного вида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков И.В. Фибробетон – состояние и перспективы применения в строительных конструкциях // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. № 5 (64). С. 24–25.
2. Моргун Л.В. Теоретическое обоснование и экспериментальная разработка технологии высокопрочных фибропенобетонов // Строительные материалы. 2005. № 6. С. 59–64.
3. Моргун Л.В. Анализ закономерностей формирования оптимальных структур дисперсно-армированных бетонов // Известия вузов. Строительство. 2003. № 8. С. 58–61.
4. Рахимов Р.З. Фибробетон – строительный материал 21 века // Экспозиция. Бетон и сухие смеси. 2008. № 26 (54). С. 35–42.
5. Баженов Ю.М. Технология бетонов XXI века // Новые научные направления в строительном материаловедении: сб. трудов Академических чтений РААСН, посвящ. 75-летию со дня рождения Ю.М. Баженова. Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. Ч. 1. С. 9–19.
6. Ведищев К.А. Фибробетон – строительный материал XXI века // Молодежь и научно-технический прогресс: сборник докладов X Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (20 апреля 2017 года, Губкин): в 4 т. Губкин, 2017. Т. 3. С. 50–53.
7. Коротких Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии): монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. 141 с.
8. Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х., Бисултанов Р.Г., Арцаева М.С. Влияние композиционного вяжущего на формирование физико-механических и эксплуатационных свойств фибробетона // Эффективные строительные композиты: науч.-практ. конф. к 85-летию заслуж. деятеля науки РФ, академика РААСН, д-ра техн. наук Ю.М. Баженова (02–03 апреля 2015 года, Белгород). Белгород, 2015. С. 592–598.
9. Kim J.-J., Yoo D.-Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 103. p. 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006>
10. Chen L., Sun W., Chen B., Shi Z., Lai J., Feng J. Multiscale study of fibre orientation effect on pullout and tensile behavior of steel fibre reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 283. p. 122506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122506>
11. Yoo D.-Y., Shin W., Chun B., Banthia N. Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 133. p. 106091. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>
12. Zeng W., Ding Y., Zhang Y., Dehn F. Effect of steel fiber on the crack permeability evolution and crack surface topography of concrete subjected to freeze-thaw damage // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 138. p. 106230. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106230>
13. Eduardo T., Buttignol T. A load induced thermal strain (LITS) semi-empirical model for plain and steel fiber reinforced concrete subjected to uniaxial compressive load // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 127. p. 105896. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105896>
14. Zhang X., Zhang W., Cao C., Xu F., Yang C. Positive effects of aligned steel fiber on bond behavior between steel rebar and concrete // Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 114. p. 103828. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103828>
15. Balendran R.V., Zhou F.P., Nadeem A., Leung A.Y.T. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete // Building and Environment. 2002. Vol. 37. Iss. 12. p. 1361–1367. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00109-3)
16. Маилян Л.П., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Халюшев А.К., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Рекомендации по учету вариативности при расчете, проектировании и изготовлении центрифугированных конструкций из тяжелого бетона [Электронный ресурс] // Вестник Евразийской науки. 2018. Т. 10. № 4. С. 6. URL: <https://esj.today/PDF/07SAVN418.pdf> (03.04.2021)

17. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Холод-
няк М.Г., Нажуев М.П., Тароян А.Г., Янов-
ская А.В. Сравнение влияния армирования
фибровыми волокнами различных видов на
свойства центрифугированных и вибриро-
ванных изделий из тяжелого бетона класса
В35 [Электронный ресурс] // Инженерный
вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 167. URL:
http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_6_Stelmakh_Shcherban.pdf_cc9dfa618.pdf
(03.04.2021)

18. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Насе-
вич А.С., Нажуев М.П., Тароян А.Г., Янов-
ская А.В. Сравнение влияния армирования
фибровыми волокнами различных видов на
свойства центрифугированных и вибриро-
ванных изделий из тяжелого бетона класса
В50 [Электронный ресурс] // Вестник
Евразийской науки. 2018. Т. 10. № 5. С. 66.

URL: <https://esj.today/PDF/29SAVN518.pdf>
(03.04.2021).

19. Щербань Е.М., Стельмах С.А., Нажуев М.П.,
Насевич А.С., Гераскина В.Е., Пошев А.У.-Б.
Влияние различных видов фибры на физико-
механические свойства центрифугированного
бетона [Электронный ресурс] // Вестник
Евразийской науки. 2018. Т. 10. № 6. С. 73. URL:
<https://esj.today/PDF/14SAVN618.pdf> (03.04.2021)

20. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Холод-
няк М.Г., Нажуев М.П., Тароян А.Г., Чебура-
ков С.В. Сравнение влияния армирования
фибровыми волокнами различных видов на
свойства центрифугированных и вибрирован-
ных изделий из тяжелого бетона класса В20
[Электронный ресурс] // Инженерный вестник
Дона. 2018. № 4 (51). С. 166. URL:
http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5_Stelmakh_Shcherban.pdf_9004eb63bd.pdf
(03.04.2021)

REFERENCES

1. Volkov IV. Fiber-reinforced concrete-the state and prospects of application in building structures. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2004;5(64):24–25. (In Russ.)
2. Morgun LV. Theoretical justification and experimental development of high-strength fiber-foam concrete technology. *Stroitel'nye Materialy*. 2005;6:59–64. (In Russ.)
3. Morgun LV. Analysis of the patterns of formation of optimal structures of dispersed-reinforced concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction*. 2003;8:58–60. (In Russ.)
4. Rahimov RZ. Fibroconcrete – building material of the 21st century. *Ekspozitsiya. Beton i sukhie smesi*. 2008;26(54): 35–42. (In Russ.)
5. Bazhenov YuM. Concrete technology of the XXI century. *Novye nauchnye napravleniya v stroitel'nom materialovedenii: sb. trudov Akademicheskikh chtenii RAASN, posvyashchennykh 75-letiyu so dnya rozhdeniya Yu.M. Bazhenova*. Part 1. Belgorod: BSTU; 2005. pp. 9–19. (In Russ.)
6. Vedishchev KA. Fiber concrete – building material of the XXI century. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress: sbornik dokladov X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* (20 April 2017, Gubkin): in 4 vol. Gubkin, 2017. Vol. 3. p. 50–53. (In Russ.)
7. Korotkikh DN. Crack resistance of modern cement concretes (problems of materials science and technology): monograph. Voronezh: Voronezhskii GASU; 2014. 141 p. (In Russ.)

8. Salamanova MSh, Ismailova ZKh, Bisultanov RG, Artsaeva MS. Influence of a composite binder on the formation of physical, mechanical and operational properties of fiber-reinforced concrete. *Effektivnye stroitel'nye kompozity: nauch.-prakt. konf. k 85-letiyu zasluzh. deyatelya nauki RF, akademika RAASN, d-ra tekhn. nauk Yu.M. Bazhenova* (02–03 April 2015, Belgorod). Belgorod, 2015. p. 592–598. (In Russ.)
9. Kim J-J, Yoo D-Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2019;103:213–223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006>
10. Chen L, Sun W, Chen B, Shi Z, Lai J, Feng J. Multiscale study of fibre orientation effect on pullout and tensile behavior of steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;283:122506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122506>
11. Yoo D-Y, Shin W, Chun B, Banthia N. Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance. *Cement and Concrete Research*. 2020;133:106091. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>
12. Zeng W, Ding Y, Zhang Y, Dehn F. Effect of steel fiber on the crack permeability evolution and crack surface topography of concrete subjected to freeze-thaw damage. *Cement and Concrete Research*. 2020;138:106230. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106230>

13. Eduardo T, Buttignol T. A load induced thermal strain (LITS) semi-empirical model for plain and steel fiber reinforced concrete subjected to uniaxial compressive load. *Cement and Concrete Research*. 2020;127:105896. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105896>

14. Zhang X, Zhang W, Cao C, Xu F, Yang C. Positive effects of aligned steel fiber on bond behavior between steel rebar and concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020;114:103828. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103828>

15. Balendran RV, Zhou FP, Nadeem A, Leung AYT. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. *Building and Environment*. 2002;37(12):1361–1367. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00109-3)

16. Mailyan LR, Stel'makh SA, Kholodnyak MG, Khalyushev AK, Shcherban' EM, Nazhnev MP. Recommendations on accounting variability the calculation, design and manufacture of centrifuged structures of heavy concrete. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2018;4(10):6. Available at: <https://esj.today/PDF/07SAVN418.pdf> [Accessed 03 April 2021] (In Russ.)

17. Stelmakh SA, Shcherban' EM, Kholodnyak MG, Nazhnev MP, Taroyan AG, Yanovskaya AV. Comparison of the effect of fiber reinforcement of various types on the properties of centrifuged and vibrated products

from heavy concrete class B35. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2018;4(51):167. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_6_Stelmakh_Shcherban.pdf_cc9dfda618.pdf [Accessed 03 April 2021] (In Russ.)

18. Stel'makh SA, Shcherban' EM, Nasevich AS, Nazhnev MP, Taroyan AG, Yanovskaya AV. Comparison of the effect of fiber reinforcement of various types on the properties of centrifuged and vibrated products from heavy concrete class B50. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2018;5:66. Available at: <https://esj.today/PDF/29SAVN518.pdf> [Accessed 03 April 2021] (In Russ.)

19. Shcherban' EM, Stel'makh SA, Nazhnev MP, Nasevich AS, Geras'kina VE, Poshev AU-B. The effect of various types of fibers on the physico-mechanical properties of centrifuged concrete. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2018;10(6):73. Available at: <https://esj.today/PDF/14SAVN618.pdf> [Accessed 03 April 2021] (In Russ.)

20. Stelmakh SA, Shcherban' EM, Kholodnyak MG, Nazhnev MP, Taroyan AG, Cheburakov SV. Comparison of the effect of fiber reinforcement of various types on the properties of centrifuged and vibrated products from heavy concrete class B20. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2018;4(51):166. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_5_Stelmakh_Shcherban.pdf_9004eb63bd.pdf [Accessed 03 April 2021] (In Russ.)

Сведения об авторах

Жеребцов Юрий Владимирович,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
✉e-mail: yuri.zharebtsov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6162-0049>

Ельшаева Диана Михайловна,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: diana.elshaeva@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8086-6300>

Information about the authors

Yuriy V. Zharebtsov,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
✉e-mail: yuri.zharebtsov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6162-0049>

Diana M. El'shaeva,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: diana.elshaeva@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8086-6300>

Лухнёва Юлия Николаевна,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: drugawi4@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5034-4029>

Yuliya N. Lukhneva,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: drugawi4@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5034-4029>

Доценко Наталья Александровна,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: natalya_1998_dotsenko@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-6401>

Natal'ya A. Dotsenko,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: natalya_1998_dotsenko@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-6401>

Самофалова Мария Сергеевна,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: mary.ss17@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9950-8696>

Mariya S. Samofalova,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: mary.ss17@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9950-8696>

Курасанов Павел Романович,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: gibbs107@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-464X>

Pavel R. Kurasanov,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: gibbs107@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-464X>

Фаталиев Асиф Агаяр оглы,
магистрант,
Донской государственный технический
университет,
344022, г. Ростов-на-Дону,
ул. Социалистическая, 162, Россия,
e-mail: asif.fataliev@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-6091>

Asif A. Fataliev,
Undergraduate,
Don State Technical University,
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,
344022, Russia,
e-mail: asif.fataliev@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5296-6091>

Заявленный вклад авторов

Жеребцов Ю.В., Ельшаева Д.М., Лухнева Ю.Н., Доценко Н.А., Самофалова М.С., Курасанов П.Р., Фаталиев А.А. имеют равные авторские права. Жеребцов Ю.В. несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

Zherebtsov Y.V., El'shaeva D.M., Lukhneva Yu.N., Dotsenko N.A., Samofalova M.S., Kurasanov P.R., Fataliev A.A. have equal author's rights. Zherebtsov Yu.V. bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 05.04.2021.
Одобрена после рецензирования 10.05.2021.
Принята к публикации 12.05.2021.

The article was submitted 05.04.2021.
Approved after reviewing 10.05.2021.
Accepted for publication 12.05.2021.



Деформативность предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочной арматурной сталью класса Ат1200

© А.И. Кауров

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Отечественная инновационная разработка высокопрочной термомеханически упрочненной арматурной стали класса Ат1200 марок 30ХГС2 и 30ХС2 позволяет повысить эффективность применения предварительно напряженного железобетона в различных отраслях строительства. Анализ деформативности преднапряженных изгибаемых железобетонных элементов с данным эффективным видом арматурной стали является основной целью настоящей работы. Для изучения особенностей напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с арматурной сталью Ат1200 проведены испытания железобетонных балочных элементов прямоугольного сечения, обычных и предварительно напряженных. Контрольный прогиб опытных элементов, являющийся критерием их деформативности, фиксировался механическими и тензометрическими измерительными устройствами. В данной работе, как отдельная часть комплексного изучения стали Ат1200 и конструкций на ее основе, представлены результаты экспериментально-теоретических исследований воздействия преднапряжения на деформативность изгибаемых железобетонных элементов. По результатам проведенных исследований констатируется, что предварительное напряжение, при соответствующем его уровне, существенно повышает жесткость (снижает деформативность) изгибаемых элементов. Обоснована возможность распространения методики действующих норм, базирующейся на общих правилах строительной механики и позволяющей учитывать не только изгибные, но и сдвиговые деформационные характеристики элементов в сечении по их длине, для расчетной оценки прогибов преднапряженных изгибаемых элементов с исследуемой сталью Ат1200. Влияние на деформативность и трещиностойкость изгибаемых элементов с напрягаемой сталью Ат1200 начальных доэксплуатационных трещин обжатия (трещин от выгиба в сжатой при эксплуатации зоне) рекомендуется осуществлять посредством полученных эмпирических зависимостей для коэффициента λ .

Ключевые слова: арматурная сталь, железобетонные изгибаемые элементы, предварительное напряжение, деформативность и жесткость, прогиб

Для цитирования: Кауров А.И. Деформативность предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочной арматурной сталью класса Ат1200. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 2. С. 260–273. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-260-273>

Deformability of prestressed flexural reinforced concrete elements with high-tensile reinforcement steel of At1200 class

Anatoliy I. Kaurov

East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

Abstract: A homegrown innovation of thermo-mechanically treated high-tensile reinforced steel (AT1200 class, 30HGS2 and 30HS2 types) increases the efficiency of prestressed reinforced concrete in the construction industry. This paper analyses the deformability of prestressed flexural reinforced concrete elements with the AT1200 reinforcement steel. To study the characteristics of the stress-strain behaviour in flexural elements with the AT1200 reinforcement steel, rectangular-sectioned, conventional and prestressed reinforced concrete beam elements were tested. Reference deflection of the test elements, which was used as a deformability criterion, was recorded by me-

chanical and strain-gauge measuring equipment. This work is part of a comprehensive study on AT1200 steel and constructional steelworks. The findings of experimental and theoretical studies are presented, addressing the effect of prestressing on the deformability in flexural reinforced concrete elements. The obtained results indicate that prestress, if applied correctly, significantly increases the stiffness (reduces the deformability) of the flexural elements. The methodology of current standards is based on a general structural theory and includes both flexural and shear strain characteristics of structures in the section over their length. The possibility of extending the method to assess deflections of the prestressed flexural elements with the studied AT1200 steel is substantiated. Empirical dependencies obtained for the μ coefficient are recommended for affecting the deformability and cracking resistance of flexural elements comprising prestressed AT1200 steel and initial preoperational prestressing cracks (deflection cracks in the zone, pressed during operation).

Keywords: reinforced steel, reinforced concrete bending elements, prestressing, deformability and rigidity, deflection

For citation: Kaurov AI. Deformability of prestressed flexural reinforced concrete elements with high-tensile reinforcement steel of At1200 class. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(2):260–273. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-260-273>

Введение

Железобетон, в первую очередь предварительно напряженный, в настоящее время является и, по прогнозам специалистов [1–8], в обозримой перспективе сохранит свои позиции доминирующего конструкционного материала.

Применение преднапряженного железобетона на основе высокопрочной арматурной стали открывает более широкие возможности для возведения современных и уникальных зданий и сооружений, одновременно способствуя значительному снижению металлоемкости несущих железобетонных конструкций при сохранении заданных параметров надежности. Поэтому разработка и освоение отечественной металлургической промышленностью высокопрочной арматурной стали является гарантом дальнейшего развития предварительно напряженного железобетона.

Технология прокатки термомеханически упрочненной арматурной стали класса At1200 марок 30ХГС2 и 30ХС2 в полном сорimente была отработана автором на Западно-Сибирском («ЕВРАЗ ЗСМК») и Криворожском («Криворожсталь») металлургических комбинатах. Данный класс стали до настоящего времени остается наиболее высокопрочным видом отечественной стержневой арматуры с условным пределом текучести $\sigma_{0.2} \geq 1200$ Н/мм² и временным сопротивлением $\sigma_u \geq 1450$ Н/мм².

Несомненным достоинством данного арматурного проката является то, что, наряду с высокой прочностью, он обладает

и высокими показателями пластичности – среднестатистические значения относительно удлинения составляют: $\delta_5 = 12\%$ и $\delta_p = 4\%$.

Особенно важным данное обстоятельство представляется для ответственного строительства, в том числе в сейсмически опасных регионах, в высотном строительстве и мостостроении, так как сталь, сочетающая высокую прочность и пластичность, способна поглощать и рассеивать при воздействии динамических нагрузок (сейсмических, ветровых и другой природы) большое количество разрушительной энергии [9–14].

В силу указанного можно констатировать, что масштабное внедрение в практику строительного проектирования напрягаемой высокопрочной экономно-легированной стали At1200 является исключительно актуальной задачей, решение которой будет способствовать достижению уровня лучших мировых стандартов в области преднапряженного железобетона.

Экономическая эффективность от применения высокопрочных материалов в строительстве к тому же хорошо коррелируется с одной из непреходящих задач человечества, а именно с задачей ресурсосбережения. Однако, высокие прочностные параметры напрягаемой арматуры At1200, особенно крупных диаметров, определяют специфику ее применения в преднапряженных элементах.

Данное обстоятельство диктует необходимость создания дополнительной нормативно-расчетной базы, отсутствие которой является одним из сдерживающих факторов широкого применения таких перспективных материалов в железобетонных конструкциях. Основываясь

на данном основополагающем принципе, в рамках работ¹ [15–20] проведены комплексные экспериментально-теоретические исследования физико-механических свойств арматурной стали Ат1200 и напряженно-деформированного состояния преднапряженных изгибаемых элементов на ее основе.

Основной же целью настоящей работы является более детальное и обстоятельное исследование деформативности предварительно напряженных изгибаемых железобетонных элементов, армированных сталью Ат1200, и обоснование возможности распространения методики действующих норм для расчета данных элементов по деформациям (прогибам).

Достоверность расчетных параметров деформативности, а также прочности и трещиностойкости опытных элементов балочного типа, в том числе полученных по разработанным оригинальным методикам, подтверждается результатами проведенных физических экспериментов².

При этом основным условием правдивости экспериментальных данных являлось обязательное дублирование тензометрических измерений деформаций материалов показаниями традиционных механических приборов высокого класса точности, таких как прогибомеры БПАО, индикаторные устройства (мессуры) и т.д., основными измерительными элементами которых служат индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм и 0,001 мм.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели проведены серийные испытания крупно-размерных опытных изгибаемых элементов с исследуемой арматурой диаметром $d_s = 12, 18$ и 25 мм.

Опытные образцы представляли собой железобетонные балки прямоугольного сечения, как обычные, так и предварительно напряженные. Номинальные размеры данных балок, изготовленных из бетона класса В40, составляли: длина $l = 2800$ мм, ширина $b = 150$ мм, высота $h = 300$ мм и 325 мм. Конструкция опытных балок I группы, предназначенных для исследования прочности нормальных сечений, трещиностойкости и

деформативности, представлена на рис. 1. Балки этой группы разбиты на серии I и II, которые отличались величиной пролета среза a и размерами поперечного сечения. К числу других варьируемых при испытании параметров относится уровень преднапряжения продольной арматуры $\sigma_{sp} / \sigma_{0,2}^{sup}$.

Общий вид силового стенда рамного типа, на котором производились испытания опытных образцов на прямой поперечный изгиб, представлен на рис. 2.

Образцы испытывались как свободно опертые однопролетные балки с зоной чистого изгиба при нагружении двумя сосредоточенными силами P .

Принципиальная схема расположения тензометрических и механических измерительных устройств, позволяющих фиксировать прогиб f опытных балок, приводится на рис. 2 и 3. Задействованная в эксперименте система измерительных устройств позволяла также определять момент образования M_{crc} , ширину раскрытия нормальных a_{crc} и наклонных $a_{crc,inc}$ трещин, деформации бетона сжатой зоны ε_{bm} и другие параметры.

Полная номенклатура экспериментального измерительного оборудования и устройств с указанием их марок и моделей и фиксируемых с их помощью параметров сведена в табл. 1.

Контрольный прогиб опытных балок f_k , как критерий их деформативности, фиксировался в середине пролета в сечении с максимальным изгибающим моментом (f_{max}), а также под местами приложения сосредоточенных нагрузок ($f_{p,1}$ и $f_{p,2}$).

Нагружение задавалось гидравлическим домкратом ДГ-50 через распределительную траверсу (рис. 2). Величина нагрузки контролировалась по манометру насосной станции, прошедшей тарировку. Нагрузка прикладывалась поэтапно и на каждом из этапов составляла не более 1/10 от прогнозируемой разрушающей нагрузки. На этапах, граничащих с моментом трещинообразования M_{crc} и исчерпанием несущей способности образца, нагрузка уменьшалась соответственно в два и три раза.

¹Кауров А.И. Влияние предварительного напряжения высокопрочной арматурной стали класса Ат1200 (Ат-УИ) на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. Улан-Удэ, 2017. 324 с.

²Там же.

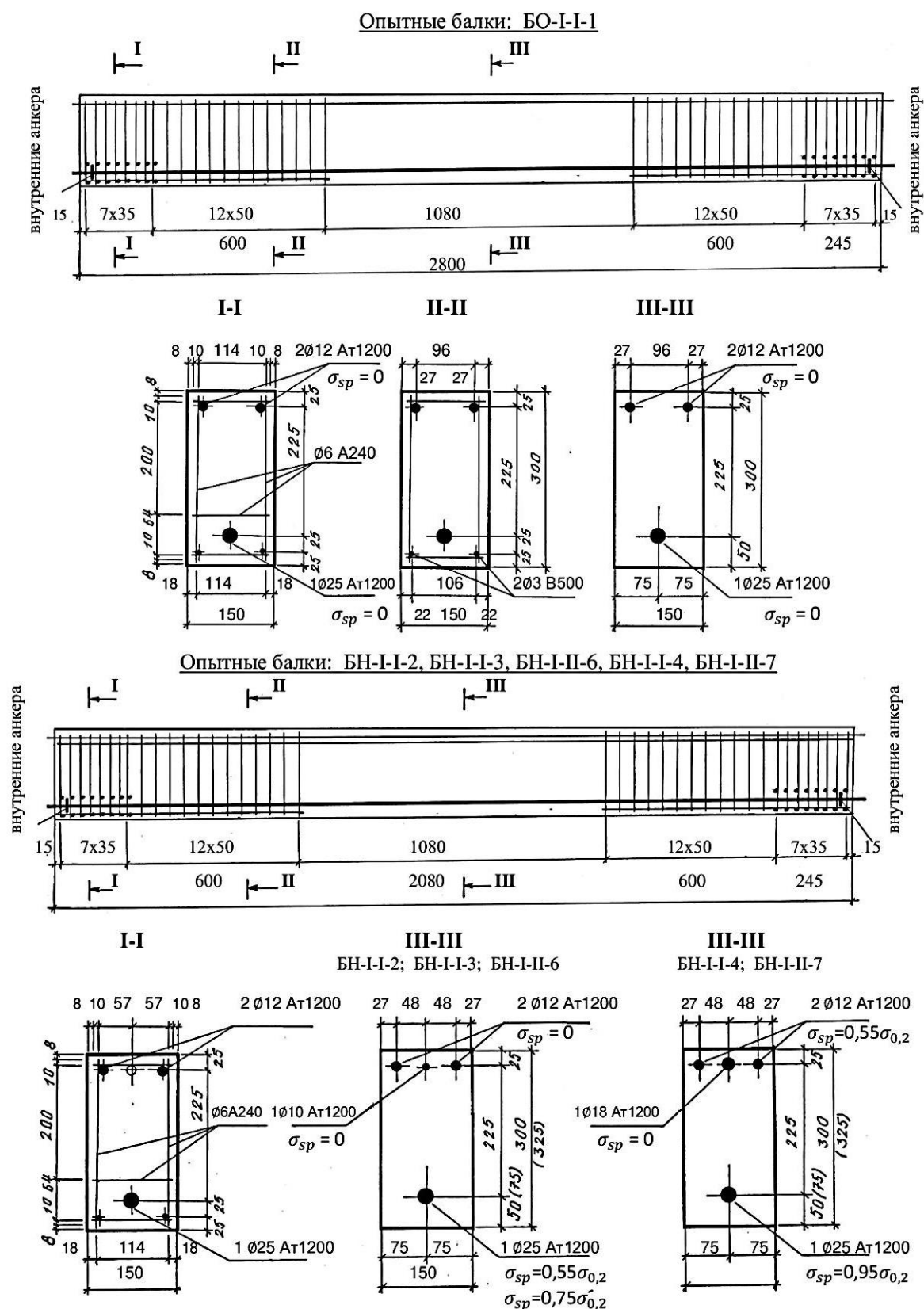


Рис. 1. Конструкция опытных балок I группы, предназначенных для исследования прочности нормальных сечений, трещиностойкости и деформативности

Fig. 1. The design of the experimental beams of group I, designed to study the strength of normal sections, crack resistance and deformability

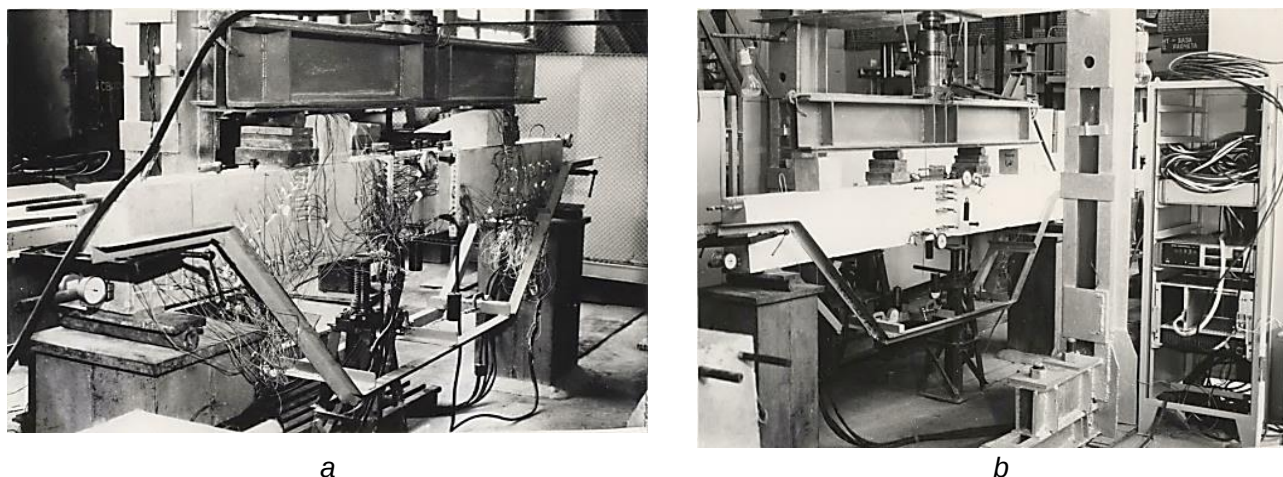


Рис. 2. Испытание на изгиб опытных элементов, вид со стороны: а – тензометрические датчики; б – механические измерительные приборы, справа тензометрическая станция ЛАСНИ-TOP 2,2
Fig. 2. Bending test of experimental elements, view from the side: а – strain gauges; б – mechanical measuring instruments, right strain gauge station LASNI-TOP 2.2

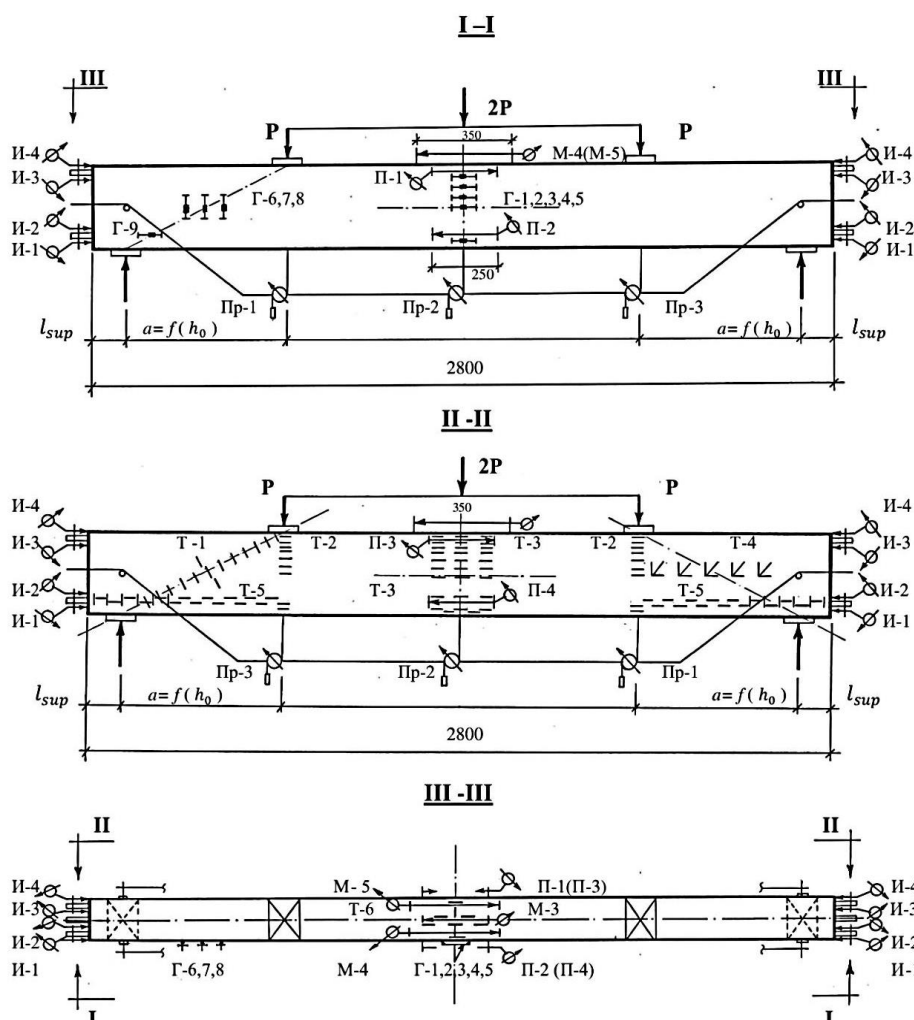


Рис. 3. Принципиальная схема размещения измерительных средств при испытании на изгиб опытных элементов
Fig. 3. Schematic diagram of the placement of measuring instruments during bending test of experimental elements

Таблица 1. Номенклатура измерительного оборудования и устройств, используемых при испытании опытных изгибаемых элементов с арматурной сталью Ат1200

Table 1. Nomenclature of measuring equipment and devices used when testing experimental bending elements with reinforcing steel Ат1200

№ п/п	Измерительное оборудование и устройства		Фиксируемые параметры
	Принятое обозначение	Наименование, марка и модель	
1	И-1,2,3,4	Симметричные пары индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм на напрягаемой арматуре	Смещение арматуры относительно бетона на торце балки (втягивание арматуры в бетон)
2	П-1,2	Прогибомеры конструкции Мокина на базе 250 мм с индикаторами часового типа 0,01 мм, закрепленные на нижней арматуре $\varnothing 25$ мм при помощи реперов	Деформации растянутой арматуры
3	П-3,4	Прогибомеры конструкции Мокина на базе 250 мм с индикаторами часового типа 0,01 мм, закрепленные на верхней арматуре $\varnothing 12$ мм при помощи реперов	Деформации сжатой арматуры
4	М-3	Мессуры на базе 250 мм с индикаторами часового типа 0,01 мм, закрепленные на верхних дополнительных арматурных стержнях при помощи реперов	Деформации сжатой напрягаемой арматуры
5	М-4,5	Мессуры на базе 350 мм с индикаторами часового типа 0,01 мм, закрепленные на бетонной поверхности верхней грани балок при помощи реперов	Деформации сжатой зоны бетона
6	Пр-1,2,3	Прогибомеры 6-ПАО, закрепленные для исключения влияния на прогибы осадки опор на металлической ферме («обноске»)	Прогиб балки в местах приложения сосредоточенной нагрузки и в середине пролета
7	Г-1,2,3,4,5	Рычажные тензометры Гугенбергера на базе 100 мм, закрепленные на бетонной поверхности в зоне чистого изгиба	Деформации в сжатой и растянутой зонах бетона
8	Г-6,7,8	Рычажные тензометры Гугенбергера на базе 100 мм, закрепленные (через «окна») на поперечной арматуре в зоне опасного наклонного сечения	Деформации поперечной арматуры
9	Г-9	Рычажные тензометры Гугенбергера на базе 100 мм, закрепленные (через «окна») на напрягаемой нижней арматуре $\varnothing 25$ мм в зоне опасного наклонного сечения	Деформации продольной арматуры
10	Т-1	Цепочки тензодатчиков с базой 50 мм на бетонной поверхности, перекрывающие зону опасного наклонного сечения	Деформации бетона и определения момента образования наклонных трещин
11	Т-2	Ряды тензодатчиков с базой 50 мм на бетонной поверхности по высоте сечения под сосредоточенной нагрузкой	Деформации бетона
12	Т-3	Ряды тензодатчиков с базой 50 мм на бетонной поверхности по высоте сечения в зоне чистого изгиба	Деформации бетона
13	Т-4	«Розетки» тензодатчиков с базой 50 мм в зоне опасного наклонного сечения	Деформации бетона и момент образования наклонных трещин
14	Т-5	Цепочки тензодатчиков с базой 50 мм на бетонной поверхности на уровне нижней напрягаемой арматуры в зоне передачи напряжений с арматуры на бетон l_p	Распределение деформаций бетона по длине l_p и момент образования нормальных трещин в растянутой зоне
15	Т-6	Тензодатчики с базой 50 мм на бетонной поверхности верхней грани балок	Деформации крайнего волокна сжатой зоны бетона

Отсчеты по измерительным приборам снимались сразу после приложения нагрузки и в конце выдержки. Время выдержки под

нагрузкой составляло 10 минут до появления в образце трещин и увеличивалось до 15 минут после появления трещин.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные значения контрольных прогибов опытных элементов f_k^{exp} как фактические перемещения, фиксируемые в

процессе испытаний в середине пролета при уровне нагрузки $M_{ser} = 73,77$ кН·м, приводятся в табл. 2.

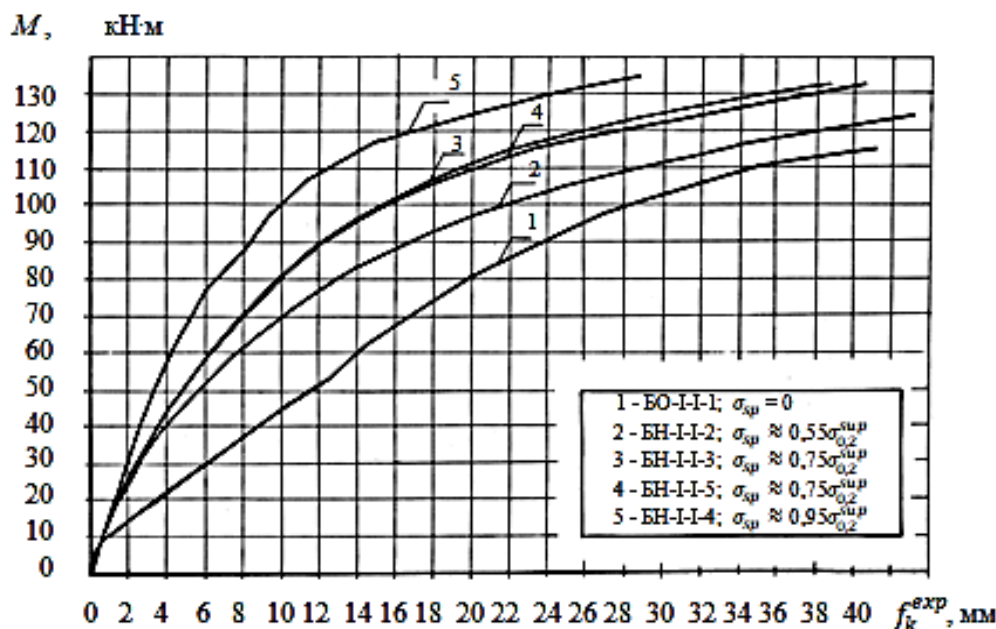
Таблица 2. Опытные и расчетные контрольные прогибы изгибаемых элементов I группы с высокопрочной арматурной сталью класса Ат1200 (при $M_{ser} = 0,6 \div 0,7 M_u$)

Table 2. Experimental and calculated control deflections of the bending elements of group I with high-strength reinforcing steel of At1200 class ($M_{ser} = 0,6 \div 0,7 M_u$)

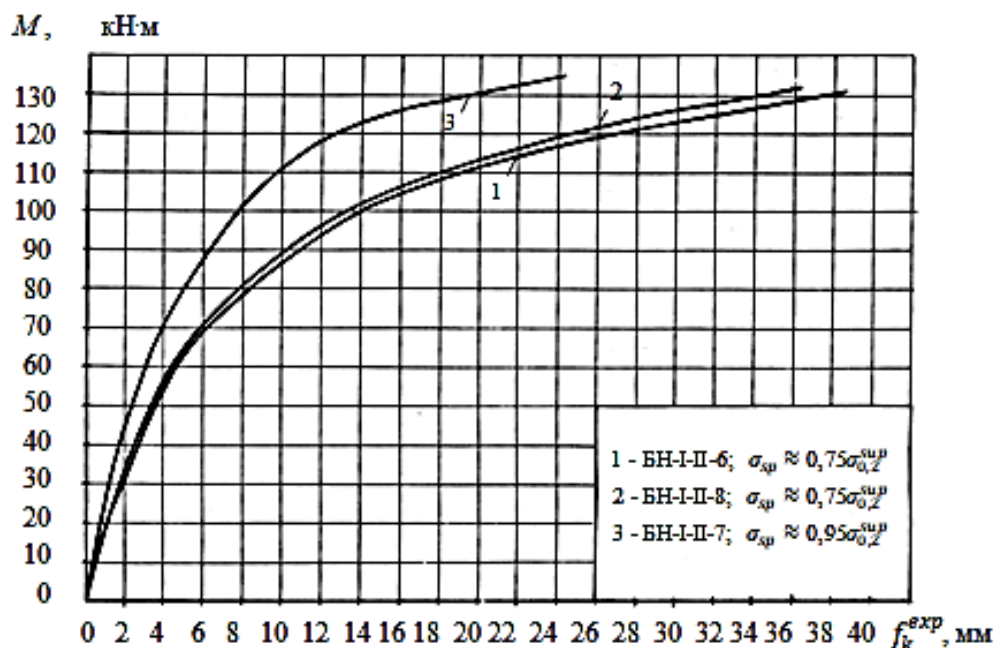
Опытные элемен- ты	$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{0,2}^{sup}}$	Опытный контроль- ный прогиб f_k^{exp} , мм	Усилие обжа- тия $P_{0,2}$, кН	Кривизна $\left(\frac{1}{r}\right) \times 10^{-5}$, см ⁻¹	Прогиб от дефор- маций изгиба f_m , мм	Прогиб от дефор- маций сдвига f_q , мм	Выгиб от усилия обжатия f_p^{th} , мм	Расчетный контроль- ный прогиб f_k^{th} , мм	Погрешность расчета* Δf_k , %
Опытные элементы без предварительного напряжения									
БО-I-I-1	0,00	18,10	–	21,12	14,31	2,94	–	17,25	+4,93
БО-II-I-10		18,41		20,97	17,50	2,84		20,34	–9,49
БО-II-II-13		19,33		20,97	17,50	2,87		20,37	–5,11
БО-II-III-16		19,52		20,25	15,24	2,84		18,08	+7,96
БО-II-IV-19		19,05		20,44	15,39	2,81		18,20	+4,67
БО-II-V-22		17,09		21,46	12,90	2,99		15,89	+7,55
*средняя величина расхождения $\bar{\Delta} f_k = \frac{f_k^{exp} - f_k^{th}}{f_k^{th}} \times 100\%$									$\Delta = +1,75\%$ $ \bar{\Delta} = 6,62\%$
Предварительно напряженные опытные элементы									
БН-I-I-2	≈0,55	11,20	185,33	8,744	5,93	1,19	4,82	11,95	–6,28
БН-II-Y-23		10,83	204,72	8,376	5,04	1,15	3,46	9,65	+12,23
БН-II-I-11		12,15	217,98	7,982	6,66	1,10	4,87	12,63	–3,80
БН-II-III-17		12,05	223,59	8,039	6,05	1,12	4,33	11,49	+4,87
БН-II-II-14		12,90	229,95	7,908	6,60	1,08	4,63	12,31	+1,54
БН-II-IV-20		12,67	237,29	7,903	5,95	1,10	3,97	11,02	+14,97
БН-I-I-3	≈0,75	8,62	290,32	3,96	2,68	0,54	7,26	10,48	–17,75
БН-I-I-5		8,69	312,14	3,98	2,70	0,55	6,66	9,91	–12,31
БН-I-II-6		6,97	301,46	3,22	2,43	0,54	5,12	8,09	–13,84
БН-I-II-8		6,73	307,56	3,33	2,50	0,55	4,98	8,03	–16,19
БН-I-I-4	≈0,95	5,74	525,87	1,57	1,06	0,21	6,36	7,63	–24,77
БН-II-IV-24		5,49	573,28	2,51	1,51	0,35	4,18	6,04	–9,11
БН-I-II-7		4,30	546,92	2,66	2,00	0,45	3,74	6,19	–30,53
БН-I-II-9		4,33	564,04	3,31	2,49	0,56	3,26	6,31	–31,38
БН-II-I-12		–	528,52	2,54	2,11	0,35	5,72	8,18	$M_{ser} > 0,8 M_u$
БН-II-II-15		7,44	513,62	2,25	1,88	0,31	6,44	8,64	–13,89
БН-II-III-18		7,03	531,44	2,31	1,74	0,32	5,62	7,68	–8,46
БН-II-IV-21		7,01	494,19	2,33	1,75	0,33	5,91	7,99	–12,26
*средняя величина расхождения $\bar{\Delta} f_k = \frac{f_k^{exp} - f_k^{th}}{f_k^{th}} \times 100\%$									$\Delta = -9,82\%$ $ \bar{\Delta} = 13,78\%$

Выбранное значение нагрузки соответствует целочисленному значению манометра задающей нагружение насосной станции $P = 50$ условных единиц и к тому же попадает в диапазон эксплуатационных нагрузок для балок I группы: $M_{ser} = 0,6 \div 0,7 M_u$. Развитие кривых прогибов при испытании и влияние предвари-

тельного напряжения, при различных значениях его уровней $\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}^{sup}$, на величину контрольного прогиба f_k^{exp} продемонстрировано на рис. 4 на примере отдельных опытных элементов.



a



b

Рис. 4. Кривые развития прогибов в середине пролетов при нагружении для элементов, разрушившихся по нормальному сечению: а – балки I группы, серия I; б – балки I группы, серия II

Fig. 4. Curves of development of deflections in the middle of spans under loading for elements, collapsed along the normal section: а – beams of group I, series I; б – beams of group I, series II

В соответствии с нормами строительного проектирования³ теоретический контрольный прогиб опытных балок f_k^{th} определялся как:

$$f_k^{th} = f_1 + f_2,$$

где f_1 – суммарный прогиб от действия всей внешней нагрузки, в том числе от собственного веса балок, а также от усилия предварительного обжатия напрягаемой арматурой; f_2 – выгиб для предварительно напряженных балок.

В целях обеспечения корректности при сопоставлении экспериментальных f_k^{exp} и теоретических f_k^{th} значений прогибов последние также рассчитывались при едином значении изгибающего момента $M_{ser} = 73,77 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Расчетные значения прогибов определяли по методике⁴, которая базируется на общих принципах строительной механики. При этом учитывались изгибные (кривизна $1/r$) и сдвиговые (угол сдвига γ_x) деформационные характеристики опытных балок в сечении по их длине.

Соотношение расчетного пролета и высоты поперечного сечения испытуемых элементов составляло $l_0/h < 10$, поэтому во внимание принималось влияние поперечных сил на прогиб.

В силу этого выражение для определения полного прогиба f имеет вид:

$$f = f_m + f_q, \quad (1)$$

где f_m – прогиб, обусловленный деформацией изгиба и определяемый функциональной зависимостью (3), исходя из значения кривизны $1/r$ (4); f_q – прогиб, являющийся результатом деформаций сдвига и вычисляемый согласно (9).

В соответствии с нормами⁵ формула для определения прогиба преднапряженных элементов, вызванного деформациями

изгиба, в общем виде записывается как:

$$f_m = \int_0^l M_x \left(\frac{1}{r} \right)_x dx, \quad (2)$$

где M_x – изгибающий момент от единичной силы в сечении x , где определяется прогиб; $\left(\frac{1}{r} \right)_x$ – суммарная кривизна от нагрузки в сечении x .

Однако допускается для свободно опертых балок постоянного сечения для сечения с максимальным изгибающим моментом использовать выражение:

$$f_m = \left(\frac{1}{r} \right) \cdot Sl_0^2, \quad (3)$$

$$\text{где } \left(\frac{1}{r} \right) = \left(\frac{1}{r} \right)_1 - \left(\frac{1}{r} \right)_2 + \left(\frac{1}{r} \right)_3 - \left(\frac{1}{r} \right)_4. \quad (4)$$

При этом принималось $(1/r)_2 = (1/r)_3 = 0$, так как при испытаниях опытных элементов вся нагрузка являлась кратковременной. Вызванная же выгибом балок кривизна $(1/r)_4$, как следствие усадки и ползучести бетона от усилия предварительного обжатия P_{02} , уменьшает их полную кривизну и, соответственно, прогиб.

Так как во всех опытных балках при заданном значении эксплуатационной нагрузки M_{ser} наличествовали нормальные трещины в растянутой зоне ($M_{ser} > M_{crc}$), а в отдельных балках имели место и начальные трещины от выгиба при обжатии усилием $P_{0,2}$, для определения кривизны $(1/r)_1$ при непродолжительном воздействии нагрузки использовались следующие выражения:

$$\left(\frac{1}{r} \right)_1 = \frac{M_{tot}}{\varphi_c b h_0^3 E_{b,red}}, \quad (5)$$

$$\text{где } M_{tot} = M_{ser} - P_{02} (1 - \lambda) e_{sp}, \quad (6)$$

$$N_{tot} = P_{02} (1 - \lambda). \quad (7)$$

³Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СП 52-102-2004) / ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 158 с.;
Методическое пособие по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций (к СП 63.13330) / ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. М.: АО ЦНИИПромзданий, 2015. 171 с.

⁴Там же.

⁵Там же.

Из выражений (5)–(7) следует, что кривизна $(1/r)_1$ и соответствующий ей прогиб балок отражают воздействие на них кратковременного момента M_{ser} , а также учитывают противодействие усилия обжатия P_{02} от напрягаемой арматуры.

Влияние на прогиб доэксплуатационных начальных трещин обжатия (трещин выгиба в сжатой при эксплуатации зоне), отмеченных в отдельных балках при высоком уровне преднапряжения $\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}^{sup}$ продольной арматуры, учитывалось посредством коэффициента λ .

Данный коэффициент корректирует усилие обжатия⁶ P_{02} .

Кривизна от остаточного выгиба $\left(\frac{1}{r}\right)_4$ определялась на основе выражения:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_4 = \frac{\sigma_{sb} - \sigma'_{sb}}{E_s h_0}. \quad (8)$$

Примененное для определения прогиба от сдвиговых деформаций f_q выражение имеет общий вид:

$$f_q = \int_0^l Q_x \gamma_x d_x, \quad (9)$$

где Q_x – поперечная сила от единичной силы в сечении x , где определяется прогиб; γ_x – угол сдвига в сечении x .

Расчетные значения контрольных прогибов f_k^{th} опытных элементов сведены в табл. 2.

Приведенное в табл. 2 сопоставление теоретических f_k^{th} и экспериментальных f_k^{exp} значений прогибов позволяет констатировать, что расхождение данных величин для обычных (без преднапряжения) элементов проявляется в меньшей степени, чем для предварительно напряженных.

Так, для предварительно напряженных

балок превышение расчетных прогибов f_k^{th} над опытными f_k^{exp} в среднем равняется $\bar{\Delta f}_k = -9,8\%$ при величине погрешности в абсолютном выражении $|\bar{\Delta f}_k| = 13,8\%$. В то время как для обычных элементов средняя величина расхождения указанных параметров составила $\bar{\Delta f}_k = +1,75\%$ (при отклонении в ту и другую стороны), погрешность в абсолютном выражении достигает $|\bar{\Delta f}_k| = 6,6\%$.

Тем не менее выявленную погрешность расчетной оценки деформативности изгибаемых элементов с высокопрочной сталью Ат1200 надлежит признать допустимой.

Основополагающим аргументом в пользу данного утверждения является то обстоятельство, что принятая расчетная методика норм для оценки деформативности содержит ряд допущений, заведомо предопределяющих ее приближенный характер.

Основными из числа таких допущений являются следующие: расчет прогибов производится при минимальной жесткости элементов; упрощенный алгоритм определения доли прогиба f_q , обусловленного деформациями сдвига. Данные допущения заведомо предполагают некоторое превышение расчетных прогибов над фактическими в пользу «запаса» надежности.

Общеизвестно, что предварительное напряжение повышает трещиностойкость и снижает деформативность железобетонных изгибаемых элементов.

Если в качестве критерия для практической оценки деформативности (жесткости) принять величину контрольного прогиба f_k^{exp} , то картина влияния предварительного напряжения на деформативность опытных балок с высокопрочной сталью Ат1200 в количественном выражении выглядит следующим образом. Уменьшение контрольного прогиба f_k^{exp} преднапряженных балок (при уровнях преднапряжения $\sigma_{sp}/\sigma_{0,2}^{sup} \approx 0,55; 0,75$ и $0,95$) по от-

⁶Кауров А.И. Влияние предварительного напряжения высокопрочной арматурной стали класса Ат1200 (Ат-УИ) на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. Улан-Удэ, 2017. 324 с.

ношению к обычным балкам ($\sigma_{sp} = 0$) в среднем составило 1,6; 2,4 и 3,2 раза, соответственно. Следует заметить, что в балочных элементах с самым высоким уровнем преднапряжения нижней арматуры $\sigma_{sp} \approx 0,95 \sigma_{0,2}^{sup}$ задавалось преднапряжение верхней арматуры $\sigma'_{sp} \approx 0,55 \sigma_{0,2}^{sup}$, призванное ограничивать недопустимый выгиб балок при обжатии усилием P_{02} и оказывающее в последующем нивелирующее воздействие на величину прогиба f_k^{exp} .

Заключение

Результаты исследований изгибаемых элементов с инновационной высокопрочной сталью Ат1200 позволяют заключить,

что методику действующих норм⁷ по определению прогибов f_k^{th} надлежит признать приемлемой для расчетной оценки деформативности предварительно напряженных изгибаемых элементов с высокопрочной сталью Ат1200 при условии обязательного учета доэксплуатационных начальных трещин обжатия (трещин от выгиба в сжатой при эксплуатации зоне). Влияние на прогиб трещин обжатия, являющихся следствием выгиба балок при высоком уровне преднапряжения $\sigma_{sp} / \sigma_{0,2}^{sup}$, рекомендуется учитывать посредством коэффициента⁸ λ , корректирующего усилие обжатия P_{02} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездов А.И., Михайлов К.В., Волков Ю.С. Предварительно напряженный железобетон: состояние и перспективы развития // Бетон и железобетон. 2000. № 5 (506). С. 2–4.
2. Мадатян С.А. Основы применения в железобетоне высокопрочной стальной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 17–20.
3. Мадатян С.А. Общие тенденции производства и применения обычной и напрягаемой арматуры // Бетон и железобетон. 1997. № 1. С. 2–5.
4. Митасов В.М. Повышение эффективности применения арматурных сталей // Бетон и железобетон. 1990. № 6. С. 19–20.
5. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон – взгляд в будущее // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 181–189.
6. Тихонов И.Н. Разработка, производство и внедрение инновационных видов арматурного проката для строительства // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 67–75. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-67-75>
7. Тихонов И.Н., Блажко В.П., Тихонов Г.И., Казарян В.А., Краковский М.В., Цыба О.О. Инновационные решения для эффективного армирования железобетонных конструкций // Жилищное строительство. 2018. № 8. С. 3–10.
8. Тихонов И.Н., Мешков В.З., Расторгуев Б.С. Проектирование армирования железобетона. М.: Изд-во Центрального института типового проектирования им. Г.К. Орджоникидзе, 2015. 273 с.
9. Звездов А.И., Снимщиков С.В., Харитонов В.А., Суриков И.Н. Проблемы и пути развития современного железобетона // Бетон и железобетон. 2015. № 4 (595). С. 2–8.
10. Кугушин А.А., Узлов И.Г., Калмыков В.В., Мадатян С.А., Ивченко А.В. Высокопрочная арматурная сталь. М.: Металлургия, 1986. 272 с.
11. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
12. Мадатян С.А. Технология натяжения арматуры и несущая способность железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1980. 196 с.
13. Jayaseelan H., Russel B.W. Reducing cambers and prestress losses by including fully ten-

⁷Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СП 52-102-2004) / ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 158 с.;
Методическое пособие по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций (к СП 63.13330) / ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. М.: АО ЦНИИПромзданий, 2015. 171 с.

⁸Кауров А.И. Влияние предварительного напряжения высокопрочной арматурной стали класса Ат1200 (Ат-YII) на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. Улан-Удэ, 2017. 324 с.

sioned top prestressing strands and mild reinforcing steel // Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI Journal). 2019. Vol. 64. Iss. 3. pp. 29–46. <https://doi.org/10.15554/pcij64.3-05>

14. Seguirant SJ, Brice R, Khaleghi B. Making sense of minimum flexural reinforcement requirements for reinforced concrete members // Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI Journal). 2010. Vol. 55. Iss. 3. pp. 64–85. <https://doi.org/10.15554/pcij.06012010.64.85>

15. Кауров А.И. К методике экспериментального исследования деформативности изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочной арматурной сталью класса Ат1200 // Образование и наука: сборник статей национальной научно-практической конференции (13-17 апреля 2020 г., Улан-Удэ). Улан-Удэ, 2020. С. 38–52. <https://doi.org/10.18101/978-5-9793-1496-9-38-52>

16. Кауров А.И. Влияние предварительного напряжения высокопрочной термомеханически упрочненной арматурной стали класса Ат1200 на прочность наклонных сечений

изгибаемых элементов // Образование и наука: материалы национальной конференции (15–23 апреля 2019 г., Улан-Удэ). Улан-Удэ, 2019. С. 93–104.

17. Кауров А.И., Аюшеев Т.В. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с учетом влияния эффекта упрочнения напрягаемой арматурной стали // Вестник ВСГУТУ. 2018. № 2 (69). С. 94–100.

18. Кауров А.И. Влияние предварительного напряжения высокопрочной арматурной стали класса Ат1200 (Ат-VII) на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов // Вестник ВСГУТУ. 2015. № 4 (55). С. 31–37.

19. Кауров А.И. Высокопрочная арматурная сталь класса Ат1200 (Ат-VII): свойства, особенности работы в предварительно-напряженных изгибаемых элементах // Бетон и железобетон. 2015. № 4 (595). С. 8–13.

20. Мадатян С.А., Кауров А.И. Расчетная оценка эффекта деформационно-температурного упрочнения арматурной стали класса Ат1200 (Ат-VII) при предварительном напряжении // Вестник ВСГУТУ. 2013. № 5 (44). С. 113–119.

REFERENCES

1. Zvezdov AI, Mikhajlov KV, Volkov YuS. Prestressed reinforced concrete: state and development prospects. *Beton i zhelezobeton*. 2000;5(506):2–4. (In Russ.)

2. Madatyan SA. Basis for the use of high-strength steel reinforcement in reinforced concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2013;1:17–20. (In Russ.)

3. Madatyan SA. General trends in the production and use of conventional and prestressed fittings. *Beton i zhelezobeton*. 1997;1:2–5. (In Russ.)

4. Mitsov VM. Improving the effectiveness the use of reinforced steels. *Beton i zhelezobeton*. 1990;6:19–20. (In Russ.)

5. Tamrazyan AG. Concrete and reinforced concrete – glance at future. *Vestnik MGSU*. 2014;4:181–189. (In Russ.)

6. Tikhonov IN. Development, production and implementation of innovative types of reinforcing bars for construction. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2019;9:67–

75. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-67-75>. (In Russ.)

7. Tikhonov IN, Blazhko VP, Tikhonov GI, Kazaryan VA, Krakovsky MB, Tsyba OO. Innovative solutions for efficient reinforcement of reinforced concrete structures. *Zhilishchnoe stroitel'stvo = Housing construction*. 2018;8:3–10. (In Russ.)

8. Tikhonov IN, Meshkov VZ, Rastorguev BS. Design of concrete structures reinforcement. Moscow: Publishing House of the Central Institute for Typical Design G.K. Ordzhonikidze; 2015. 273 p. (In Russ.)

9. Zvezdov AI, Snimshchikov SV, Kharitonov VA., Surikov IN. Problems and development paths of modern reinforced concrete. *Beton i zhelezobeton*. 2015;4(595):2–8. (In Russ.)

10. Kugushin AA, Uzlov IG, Kalmykov VV, Madatyan SA, Ivchenko AV. High Strength Reinforced Steel. Moscow: Metallurgy; 1986. 272 p. (In Russ.)

11. Madatyan SA. Reinforcement of concrete structures. Moscow: Voentekhlit; 2000. 256 p. (In Russ.)

12. Madatyan SA. Reinforcement tension technology and bearing capacity of reinforced concrete structures. Moscow: Strojizdat; 1980. 196 p. (In Russ.)
13. Jayaseelan H, Russel BW. Reducing cambers and prestress losses by including fully tensioned top prestressing strands and mild reinforcing steel. *Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI Journal)*. 2019;64(3):29–46. <https://doi.org/10.15554/pcij64.3-05>
14. Seguirant SJ, Brice R, Khaleghi B. Making sense of minimum flexural reinforcement requirements for reinforced concrete members. *Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI Journal)*. 2010;55(3):64–85. <https://doi.org/10.15554/pcij.06012010.64.85>
15. Kaurov AI. To the method of experimental study of deformativity of bended reinforced concrete elements with high-strength reinforced steel of At1200 class. *Obrazovanie i nauka: sbornik statej nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 13–17th April 2020, Ulan-Ude. Ulan-Ude, 2020. pp. 38–53. <https://doi.org/10.18101/978-5-9793-1496-9-38-52> (In Russ.)
16. Kaurov AI. Effect of preliminary voltage high-strength thermomechanically strength armature steel class At1200 for durability of inclined sections of bended elements. *Obrazovanie i nauka: materialy nacional'noj konferencii*. 15–23rd April 2019, Ulan-Ude. Ulan-Ude, 2019. pp. 93–104. (In Russ.)
17. Kaurov AI, Ayusheev TV. Normal sections' strength calculation of bending RC elements taking into account the hardening effect of prestressing reinforced steel. *Vestnik VSGUTU = ESSUTM Bulletin*. 2018;2(69):94–100. (In Russ.)
18. Kaurov A.I. The influence of prestressed high-strength reinforced At-1200 (At-VII) steel on the bearing capacity of flexural reinforced members. *Vestnik VSGUTU = ESSUTM Bulletin*. 2015;4(55):31–37. (In Russ.)
19. Kaurov A.I. High-strength reinforced steel of the At1200 (At-VII) class: properties, features of work in prestressed bendable elements. *Beton i zhelezobeton*. 2015;4(595):8–13. (In Russ.)
20. Madatyan SA, Kaurov AI. Assessment of strain & thermal hardening effect of reinforced steel At-1200 (At-VII) during prestressing. *Vestnik VSGUTU = ESSUTM Bulletin*. 2013;5(44):113–119. (In Russ.)

Сведения об авторе

Кауров Анатолий Иванович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного и
гражданского строительства,
Восточно-Сибирский государственный
университет технологий и управления,
670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В,
Россия,
✉e-mail I: kai-rb@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5101-5144>

Information about the author

Anatoliy I. Kaurov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Industrial and Civil Engineering,
East Siberia State University
of Technology and Management,
40B Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, 670013,
Russia,
✉e-mail I: kai-rb@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5101-5144>

Заявленный вклад авторов

Кауров А.И. провел исследования, подготовил статью к публикации, владеет авторскими правами на статью и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the authors

Kaurov A.I. has conducted the studies, prepared the article for publication, owns the copyright to the article and is responsible for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов относительно публикации данной статьи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 30.03.2021.

The article was submitted 30.03.2021.

Одобрена после рецензирования 29.04.2021.

Approved after reviewing 29.04.2021.

Принята к публикации 03.05.2021.

Accepted for publication 03.05.2021.