

УДК 691.328+624.012.35/45

К.В. ТАЛАНТОВА

**О СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ФИБРОАРМИРОВАННОГО СЕЧЕНИЯ И РЕГУЛЯРНОЙ АРМАТУРЫ В СТАЛЕФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ**

Создание сталефиброжелезобетонных конструкций с заданными характеристиками и оценка совместной работы фиброармированного сечения и регулярной арматуры потребовало проведения экспериментально-теоретических и численных исследований деформативности и характера работы под нагрузкой сталефибробетона и сталефиброжелезобетонных элементов в зависимости от типа стальных фибр. Результаты исследований позволили проанализировать работу фиброармированного сечения в зависимости от типа стальных фибр и их влияния на прочностные и деформативные свойства сталефибробетона и его взаимодействия с регулярной арматурой. Однако остается ряд вопросов, которые требуют ответов. При этом совместность работы структурных элементов конструкций на основе сталефибробетона и рост технико-экономических показателей последних могут быть обеспечены за счет управления совместностью работы фиброармированного сечения и регулярной арматуры.

**Ключевые слова:** стальные фибры, сталефибробетон, регулярная арматура, деформативность, предельная сжимаемость, предельная растяжимость, совместность деформаций, характер разрушения.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-725-5-30-38

Результаты исследований, полученные много десятилетий назад, показали возможность и целесообразность объединения свойств бетона и арматуры – создания железобетонных конструкций. Несколько позже интерес ученых и специалистов привлекли другие виды армирования, в частности, «железным волосом» или «железной соломой». Эти термины ввел российский инженер В.Н. Некрасов [1].

Армированные «железным волосом» бетонные (сталефибробетонные или сталефиброжелезобетонные) элементы изучаются более 100 лет и на сегодняшний день накоплен серьезный объем результатов исследований и практики их применения.

Создание железобетонных конструкций (ЖБК) оказалось возможным, благодаря гарантированной совместности напряжений и деформаций арматуры и бетона, что обеспечивается, помимо прочего, надежным сцеплением по их контакту. Более того, на основании результатов опытов Консидера<sup>1</sup> можно заключить, что растянутая арматура при хорошем ее распределении в бетоне оказывает благоприятное влияние на монолитность бетона и отодвигает появление в нем первых трещин.

Многочисленные исследования позволили оценить предельные деформации бетона на растяжение (в среднем 0,0002 в момент его разрыва) и пре-

<sup>1</sup> Considère. Compptes rendus de l'Académie des sciences. 1899. Т. 129.

дельные деформации арматуры (на растяжение 0,002 – в начале ее текучести) и на сжатие, бетона (в среднем в сжатой зоне изгибаемых элементов 0,0035 и сжатых элементов 0,002), на базе чего разработана теория расчета ЖБК [2–5].

В конструкциях на основе сталефибробетона (СФБ) стальная фибра распределяется дисперсно по всему объему элемента либо по его зонам, в зависимости от расчетной схемы, действующих нагрузок и воздействий, определяющих напряженно-деформированное состояние последнего (рис. 1).

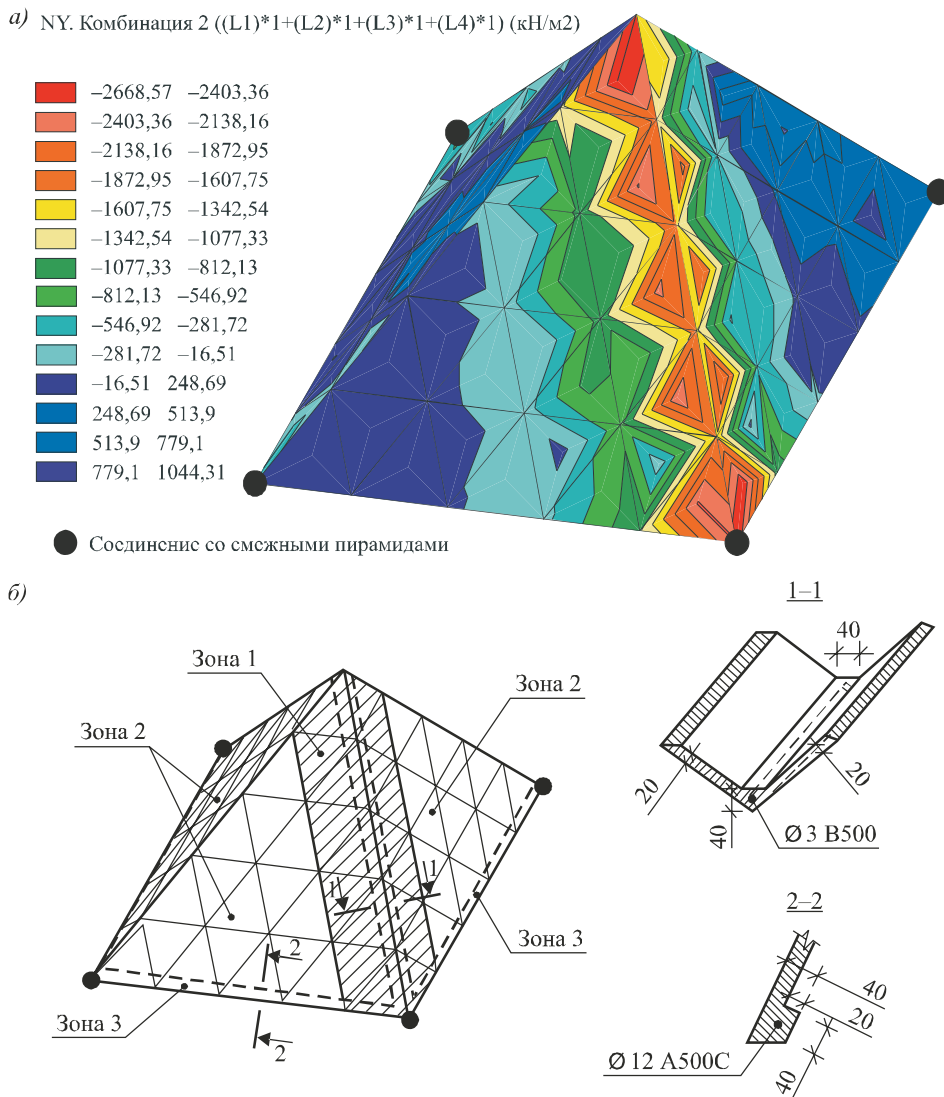


Рис. 1. Схемы к расчету пирамидального элемента нижнего пояса П-2 структурного тонкостенного сталефибробетонного покрытия

а – картина полей напряжений, полученная в результате статического расчета средствами BK SCAD – зона 1 –  $\sigma_t = 2,66$  МПа; зона 2 –  $\sigma_t = 1,07$  МПа; зона 3 –  $\sigma_t = 1,07$  МПа;  $N_t = 51,27$  кН; б – схема зонного монодисперсного фибрового и регулярного армирования  $d_f = 0,6$  мм,  $l_f = 70$  мм, B<sub>f</sub> 35: зона 1 –  $R_{fbt} = 2,52$  МПа ( $\mu_{fv} = 1,0$  %) + Ø3B500; зона 2 –  $R_{fbt} = 1,74$  МПа ( $\mu_{fv} = 0,5$  %); зона 3 –  $R_{fbt} = 1,74$  МПа ( $\mu_{fv} = 0,5$  %) + Ø12A500C

Стержневая или проволочная арматура, называемая регулярной, как и в ЖБК, размещается в зонах максимальных усилий и напряжений, и совместная работа арматуры с фиброармированным сечением обеспечивается сцеплением фибры с бетонной матрицей и сталефибробетона – с регулярной арматурой.

Однако для обеспечения совместной работы регулярной арматуры и фиброармированного сечения необходимо, чтобы характеристики фибры и арматуры соответствовали друг другу, принятому исходному бетону по структуре, прочности и деформативности.

Предельная сжимаемость регулярной арматуры практически равна растяжимости, но известно, что арматура, размещенная в ЖБ сжатых элементах (сжатой зоне внецентренно нагруженных и изгибаемых элементов), выходит из работы при образовании трещин в бетоне.

Результаты исследований совместной работы фиброармированного сечения и регулярной арматуры в сталефиброжелезобетонных конструкциях (СФЖБК) [6] показали, что в основе своей условия прочности (трещиностойкости и жесткости) таких конструкций подобны ЖБК, а именно:  $M \leq M_s + M_{fbt}$  или  $M \leq M_{fb}$  (рис. 2). Отличие, как известно, состоит в учете в растянутой зоне элемента сопротивления СФБ растяжению, а в сжатой зоне – сопротивления СФБ сжатию. При этом в общем случае напряжения растяжения от внешних нагрузок меньше или равны напряжениям сечения  $\sigma_t \leq \sigma_{fbt} + \sigma_s$ , это же неравенство должно соблюдаться и в сжатой зоне  $\sigma_c \leq \sigma_{fb}$ . При этом усилия в сжатой и растянутой зонах элементов должны быть равны:  $R_{fbt} A_{fbt} + R_s A_s = R_{fb} A_{fb}$ .

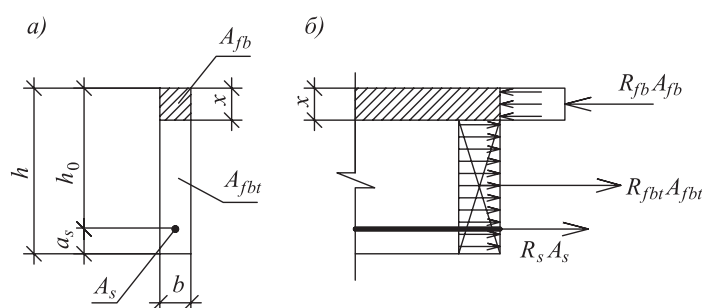


Рис. 2. Схемы к расчету нормального сечения сталефиброжелезобетонного изгибаемого элемента  
а – расчетное сечение; б – схема усилий в нормальном сечении

Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых [6–14] свидетельствуют о том, что сопротивление СФБ растяжению, характеристика, которую можно регулировать, существенно выше сопротивления исходного бетона. Сопротивление СФБ сжатию превышает аналогичную прочность исходного бетона [7].

Однако, как указано в СП<sup>2</sup> при проектировании конструкций на основе СФБ расчетное сопротивление СФБ сжатию следует принимать равным

<sup>2</sup> СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2017. 40 с.

призменной прочности исходного бетона, согласно данным СП<sup>3</sup>, а расчетное сопротивление растяжению – некоей остаточной прочности с одним из индексов. В СП<sup>2</sup> не приведено правил выбора ни остаточной прочности, ни ее индекса.

Нет и расшифровки физического смысла такой прочности и не указано, в каком случае следует ею воспользоваться.

Что же касается прочности СФБ на сжатие, то не ясно, на каком основании даны указания использования в расчетах сопротивления исходного бетона.

Кроме того, в СП<sup>2</sup> рекомендуется использовать и мелкозернистый, и бетон с крупным заполнителем. Хотя результаты значительного количества исследований, представленных в Рекомендациях<sup>4</sup>, показали, что крупность заполнителя должна определяться в соответствии с геометрией фибр.

Максимальный размер фракций заполнителя для сталефибробетона не должен превышать 0,25 длины используемой фибры и величины  $S$ , определяемой по формуле:

$$S = \frac{d_{fred}}{\sqrt{\mu_{fv} \cdot \kappa_{or}}},$$

где  $d_{fred}$  – приведенный диаметр фибр, мм;

$\mu_{fv}$  – коэффициент фибрового армирования по объему;

$\kappa_{or}$  – коэффициент ориентации фибр, определяемый по Рекомендациям<sup>4</sup>.

Кроме того, исследования [8], выполненные в 1970-е гг., показали, что применение крупного заполнителя резко снижает физико-механические характеристики СФБ, что не позволяет получить материал с ожидаемыми характеристиками (рис. 3).

На совместность работы регулярной арматуры и фиброармированного сечения помимо прочего оказывает влияние стальная фибра: ее количество ( $\mu_{fv}$ ), тип (проволочная, листовая, литая и т.п.), диаметр ( $d_f$ ), отношение длины и диаметра ( $l_f/d_f$ ), состояние поверхности, расчетное сопротивление растяжению  $R_{sf}$ , деформативные характеристики, тип бетонной матрицы (мелкозернистая, с добавлением крупного заполнителя).

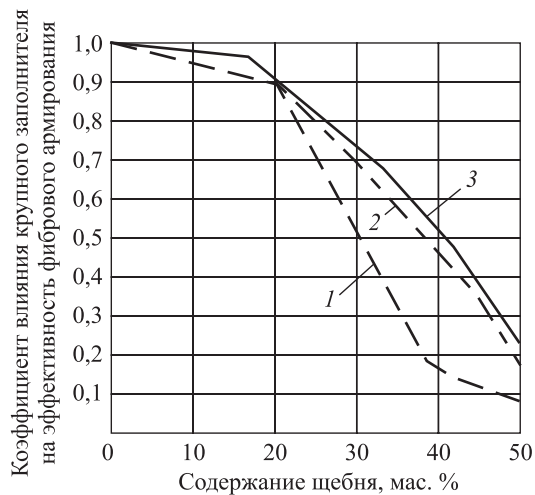


Рис. 3. Зависимость эффективности фибрового армирования от количества щебня  
1 – растяжение; 2 – сжатие; 3 – трещиностойкость

<sup>3</sup> СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями N 1, 2). М.: Минстрой России, 2015. 223 с.

<sup>4</sup> Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. М., 1987. 148 с.

Исследования [6] показали, что разрушение СФЖБ изгибаемого (внецентренно нагруженного) элемента, т.е. исчерпание совместности работы, наступает, в общем случае, при достижении в растянутой зоне элемента расчетного сопротивления СФБ на растяжение  $R_{fbt}$  и физического предела текучести  $\sigma_y$  регулярной арматуры, в сжатой зоне – расчетного сопротивления СФБ на сжатие  $R_{fb}$ .

Иными словами, обеспечение прочности нормального сечения СФЖБ в растянутой зоне достигается регулярной арматурой и фиброармированным сечением, при этом происходит перераспределение усилий между ними при их рациональном сочетании. Вклад фибрового армирования в прочность сечения зависит от характеристик бетонной матрицы и объемного содержания стальных фибр в растянутой зоне СФЖБ элемента: ее геометрических, прочностных и деформативных характеристик СФБ ( $B_{fb}$ ,  $E_{fb}$ ,  $\varepsilon_{fbtu}$ ).

Характер совместной работы фиброармированного сечения и регулярной арматуры в растянутой зоне зависит от стадии работы последней (упругой или пластической) и свойств СФБ. Сталефибробетон в опасном растянутом сечении достигает временного сопротивления растяжению  $R_{fbtu}$  до или после начала текучести регулярной арматуры в зависимости от деформативности СФБ, которая зависит от деформативности фибр (см. таблицу, рис. 3).

**Предельная сжимаемость и растяжимость сталефибробетона в зависимости от типа стальных фибр\***

Относительные деформации сталефибробетона в зависимости от напряженно-деформированного состояния образцов	Тип стальных фибр. Объемный процент армирования, $\mu_{fv} = 2,0\%$			
	токарная	проволочная	листовая	фрезерованная
Предельные деформации сжатия $\varepsilon_{fbcu} \times 10^{-3**}$	2,3±0,036	3,23±0,050	2,3±0,040	1,82±0,033
Предельные деформации растяжения $\varepsilon_{fbtu} \times 10^{-4**}$	19,20±0,355	26,25±0,496	12,90±0,245	4,51±0,029

\* Представлены результаты экспериментальных исследований автора.

\*\* Среднее значение относительной деформации показано с отклонением по формуле ( $\bar{X} \pm m$ ).

При разрушении СФЖБ элемента начало разрушения СФБ в сжатой зоне может не совпадать с исчерпанием прочности растянутой зоны (из-за более раннего или позднего наступления временного сопротивления растяжению регулярной арматуры и фиброармированного сечения). При этом, регулируя свойства СФБ в соответствии с эксплуатационными требованиями, можно задать характер совместной работы регулярной арматуры и фиброармированного сечения.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что в случае использования пластичной проволочной или токарной фибры (ГОСТ 3282 Б ст.0) имеет место пластическое разрушение СФБ элемента, вязкость при разрушении, заданная прочность и трещиностойкость (рис. 4, а). При достижении в нормальном сечении СФБ элемента предельной растяжимости

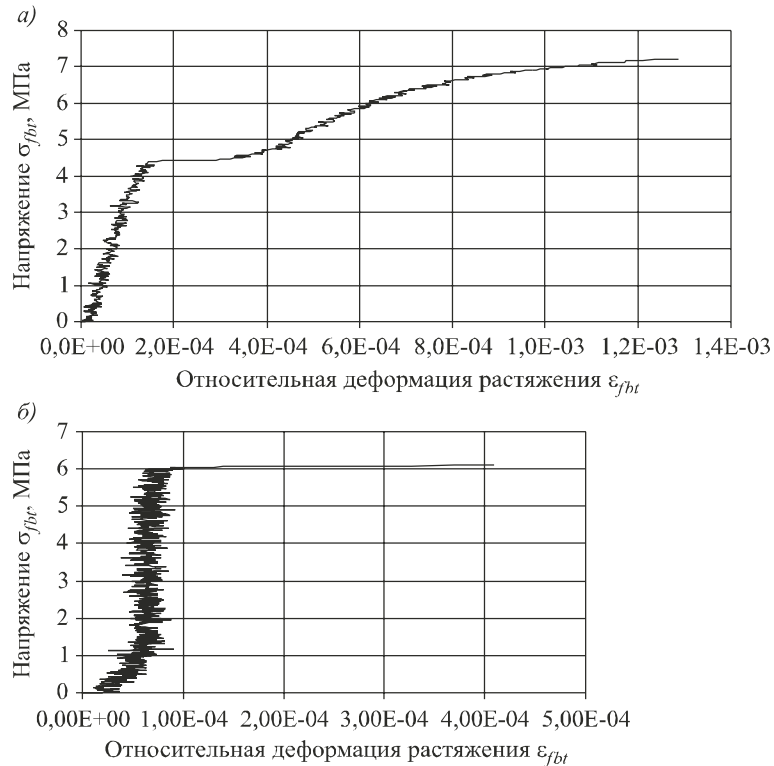


Рис. 4. График зависимости напряжение – деформация сталефибробетона при испытании на растяжение при изгибе лабораторных образцов  $4 \times 4 \times 16$  см с фиброй  
 а – токарной; б – фрезерованной;  $\mu_{f\bar{r}} = 2\%$

и сжимаемости, а также предела текучести в растянутой регулярной арматуре можно ожидать практически одновременного исчерпания прочности в растянутой и сжатой зонах за счет перераспределения напряжений СФБ и регулярной арматуры в растянутой зоне.

Графики напряжение – деформация, полученные при оценке деформативных характеристик СФБ, а также наблюдения работы материала под нагрузкой позволяют сделать вывод о вязкой пластической работе СФБ с такой фиброй (рис. 4, а).

При использовании хрупкой фрезерованной фибры прочность элемента по нормальному сечению определяется работой растянутой регулярной арматуры. При этом вклад фиброармированного сечения в формирование структуры СФБ, прочность и деформативность элемента невелик. Последнее свидетельствует о необеспеченности совместности работы этого типа фибры и бетонной матрицы. Предельная растяжимость СФБ с фрезерованной фиброй значительно меньше (рис. 4, б), при этом наблюдалось хрупкое разрушение материала с характерным треском и обрывом фибр.

Таким образом, регулируя деформативные характеристики СФБ и стадию работы регулярной арматуры, можно управлять характером совместной работы фиброармированного сечения и регулярной арматуры.

Сравнительный анализ данных позволил оценить прирост прочности СФБ на сжатие ( $R_{fbr}$ ) в соотношении с прочностью контрольного бетона ( $R_{bm}$ )

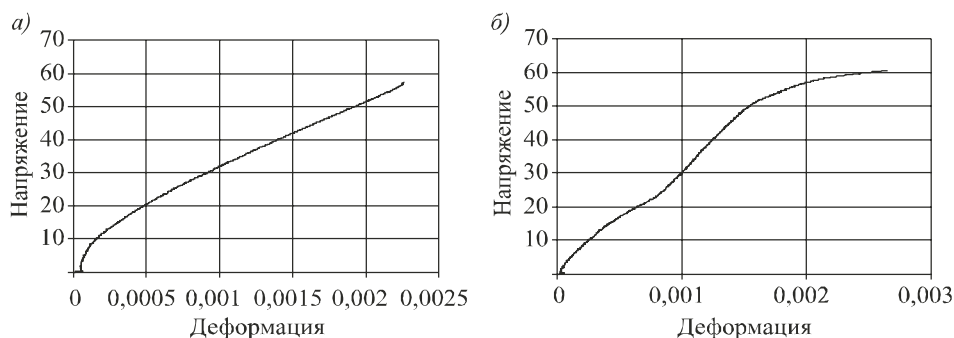


Рис. 5. График зависимости напряжение – деформация при испытании на сжатие лабораторных образцов–призм сталефибробетона  
 а – с токарной фиброй; б – с проволочной фиброй;  $\mu_{f\sigma} = 2 \%$

(рис. 5), который составил от 10 до 50 %, что соответствует литературным данным [9].

Максимальный прирост прочности был получен для СФБ с проволочной фиброй.

При этом разброс показателей прочности на сжатие в зависимости от типа фибр относительно невелик. Этот факт еще раз подтверждает то, что прочность СФБ на сжатие, а значит и СФЖБ, в большей степени зависит от характеристик бетонной матрицы.

Таким образом, результаты исследований позволили сделать вывод о том, что более предпочтительной с точки зрения обеспечения совместности работы фиброармированного сечения и регулярной арматуры и получения ощутимых технико-экономических преимуществ, является стальная малоуглеродистая фибра малых диаметров.

Что же касается других типов фибр, то в зависимости от эксплуатационных требований к элементам конструкций необходимо подбирать фибру, регулярную арматуру и исходный бетон с физико-механическими характеристиками, соответствующими друг другу и заданным свойствам элементов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Некрасов В.П. Метод косвенного вооружения бетона. М.: Транспечать, 1925. 255 с.
2. Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона. М., Л.: Госстройиздат, 1941. 447 с.
3. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В.А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
4. Развитие бетона и железобетона в СССР / Ред. К.В. Михайлов. М.: Стройиздат, 1969. 376 с.
5. Берг О.Я. Физические основы прочности бетона и железобетона М.: Госстройиздат, 1961. 96 с.
6. Вылехжанин В.П., Григорьев В.И. О совместной работе стержневой и фибровой арматуры в изгибаемых сталефибробетонных элементах // Исследование и расчет новых типов пространственных конструкций гражданских зданий: сб. науч. тр. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1985. С. 77–81.

7. Курбатов Л.Г., Боровских Н.Н. Сопротивление сталефибробетона сжатию // Исследование и расчет новых типов пространственных конструкций гражданских зданий: сб. науч. тр. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1985. С. 58–62.
8. Куликов А.Н. Экспериментально-теоретические исследования свойств фибробетона при безградиентном напряженном состоянии в кратковременных испытаниях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975. 25 с.
9. Косарев В.М. Экспериментально-теоретические исследования прочности и деформативности изгибаемых и центрально-сжатых элементов сталефибробетонных конструкций при кратковременном воздействии нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1980. 25 с.
10. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография. М.: АСВ, 2011. 642 с.
11. Beddar M. Fiber reinforced concrete: past, present and future // Scientific works of the 2nd International conference on concrete and reinforced concrete. M., 2005. Vol. 3. P. 228–234.
12. Johnston C.D. Properties of steel fibre reinforced mortar and concrete // Symposium on fibrous concrete (Ci80, London, 1980), the Construction Press, Lancaster. London, 1980. P. 29–47.
13. Krátký J., Trink K., Vodička J. Dratkobetonové konstrukce. Smernice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení dratkobetonových konstrukcí. Praha: Technical Manual, 1999. 80 p.
14. Walraven J. The evolution of concrete // Structural concrete. Journal of the fib. 1999. Vol. 1. No. 1. P. 3–11.

**Талантова Клара Васильевна**, д-р техн. наук, доц.; E-mail: talant\_bar@mail.ru  
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

Получено 18.04.2019

**Talantova Klara Vasil'evna**, DSc, Ass. Professor; E-mail: talant\_bar@mail.ru  
Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint Petersburg, Russia

## **COMBINED WORK OF FIBER REINFORCED SECTION AND REGULAR FIXTURE IN THE STEEL FIBER CONCRETE ELEMENTS**

Creating steel fiber reinforced concrete structures with specified characteristics and evaluation of the interaction between steel fiber reinforced concrete section and a regular fixture which necessitated experimental, theoretical and numerical studies of the deformations and the nature of the workload of steel fiber concrete and steel fiber reinforced concrete elements depending on the type of steel fibers. The results of the research made it possible to analyze the work of cross-section with the reinforced steel fibers depending on the type of steel fibers and their impact on the strength and the deforming properties of steel fiber concrete and its interaction with the regular fixtures. Therefore, a number of issues requires responses. In this interaction between the structural building elements based on steel fiber reinforcement and growth of technical and economic indices can be achieved at the expense of combining reinforced fiber cross section and a regular fixture.

**Key words:** steel fibers, steel fiber reinforced concrete, regular fitting, deformability, limiting the compressibility, elasticity limit, shared deformations, fracture mode.



REFERENCES

1. Nekrasov V.P. Metod kosvennogo vooruzheniya betona [Metod of indirect armament of concrete]. Moscow, Transpechat', 1925. 255 p. (in Russian)
2. Stolyarov Ya.V. Vvedeniye v teoriyu zhelezobetona [Introduction of the steel concrete theory]. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat, 1941. 477 p. (in Russian)
3. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut stroitel'nykh konstruksiy imeni V.A. Kucherenko [Centre of the scientific research in construction named after V.A. Kucherenko]. Moscow, Sroyizdat, 1974. 316 p. (in Russian)
4. Razvitiye betona i zhelezobetona v SSSR [Development of reinforced concrete in the USSR]. Red. K.V. Mikhaylov. Moscow, Gosstroyizdat, 1969. 376 p. (in Russian)
5. Berg O.Ya. Fizicheskiye osnovy prochnosti betona i zhelezobetona [The physical basis of the strength of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Gosstroyizdat, 1961. 96 p. (in Russian)
6. Vylekzhanin V.P., Grigor'ev V.I. O sovместnoy rabote sterzhnevoy i fibrovoy armatury v izgibayemykh stalefibrozhelezobetonnykh elementakh [On joint work of rod and fiber reinforcement in bended steel fiber concrete elements]. Issledovaniye i raschet novykh tipov prostranstvennykh konstruksiy grazhdanskikh zdaniy: sbornik nauchnykh trudov [Research and calculation of new types of spatial structures of civil buildings: a collection of scientific works]. Leningrad, LenZNIIEP, 1985. Pp. 77–81. (in Russian)
7. Kurbatov L.G., Borovskikh N.N. Soprotivleniye stalefibrobetona szhatiyu [Resistance of steel fibro concrete to compression]. Issledovaniye i raschet novykh tipov prostranstvennykh konstruksiy grazhdanskikh zdaniy: sbornik nauchnykh trudov [Research and calculation of new types of spatial structures of civil buildings: a collection of scientific works]. Leningrad, LenZNIIEP, 1985. Pp. 58–62. (in Russian)
8. Kulikov A.N. Eksperimental'no-teoreticheskiye issledovaniya svoystv fibrobetona pri bezgradiyentnom napryazhenom sostoyanii v kratkovremennykh ispytaniyakh: avtoref. dis. ... kand. techn. nauk [Experimental and theoretical studies of the properties of fiber-reinforced concrete with a gradient-free stressed state in short-term trials: author. diss. ... PhD]. Leningrad, 1975. 25 p. (in Russian)
9. Kosarev V.M. Eksperimental'no-teoreticheskiye issledovaniya prochnosti i deformativnosti izgibayemykh i tsentral'no-szhatykh elementov stalefibrobetonnykh konstruksiy pri kratkovremennom vozdeystvii nagruzki: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Experimental and theoretical studies of the strength and deformability of bending and centrally compressed elements of steel fiber-reinforced concrete structures under short-term load effects: author. diss. ... PhD]. Leningrad, 1980. 25 p. (in Russian)
10. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii: monografiya [Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, design: monograph]. Moscow, ASV, 2011. 642 p. (in Russian)
11. Beddar M. Fiber reinforced concrete: past, present and future. Scientific works of the 2<sup>nd</sup> International conference on concrete and reinforced concrete. Moscow, 2005. Vol. 3. Pp. 228–234.
12. Johnston C.D. Properties of steel fibre reinforced mortar and concrete. Symposium on fibrous concrete (Ci80, London, 1980), the Construction Press, Lancaster. London, 1980. Pp. 29–47.
13. Krátký J., Trink K., Vodička J. Dratkobetonove konstrukce. Smernice pro navrhovany, provadeny, kontrolu vyroby a zkouseni dratkobetonovych konstrukci. Praha: Technical Manual, 1999. 80 p.
14. Walraven J. The evolution of concrete. Structural concrete. Journal of the fib. 1999. Vol. 1. No. 1. Pp. 3–11.