Игорь Арменакович АРЗУМАНОВ, инженер, главный специалист лаборатории химических добавок и модифицированных бетонов, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Igor ARZUMANOV, engineer, chief specialist of laboratory of chemical additives and modified concrete, NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: arzumanov@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 174-7629

Игорь Анатольевич ЧИЛИН, инженер лаборатории химических добавок и модифицированных бетонов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Igor CHILIN, engineer of laboratory of chemical additives and modified concrete, NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: hilin@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 174-75-91

УДК 691.32
http://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-41-50

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА В ЭЛЕМЕНТАХ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

EXPERIENCE IN USING ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

М. С. МАРЧЕНКО
И. А. ЧИЛИН
Н. М. СЕЛЮТИН

Приведены реализованные в России примеры применения сверхвысокопрочного сталефибробетона для несущих конструкций. Из этого материала с пределами прочности на сжатие 150 МПа, растяжение при изгибе – 21 МПа, растяжение осевое – 8,5 МПа изготовлены упоры преднапряженных конструкций мостов и резервуаров вместо обычно используемых стальных упоров.

Проведены натурные испытания упоров, которые не выявили признаков деформаций и разрушения элементов при натяжении на них канатов как на уровне расчётных нагрузок, так и разрушающих – до разрыва канатов.

Сделан вывод о целесообразности замены стальных упоров на упоры из рассматриваемого материала, который при высоких прочностных характеристиках обладает сверхнизкой проницаемостью и высокой

The article presents examples of the use of ultra-high performance fiber reinforced concrete for load-bearing structures in Russia. Using this material with limits of compressive strength 150 MPa, flexural tensile strength 21 MPa, tensile strength 8.5 MPa, external post-tensioned structures of bridges and tanks are made instead of common solution with the steel anchors.

Full-scale tests of anchors were carried out, which did not reveal signs of deformations and destruction of elements during the tension of strands, at the level of design and ultimate loads - before strands rupture.

It was concluded that it is advisable to replace steel anchors with anchors from the material, which, with high strength characteristics, has ultra-low permeability and high frost resistance corresponding to the F21000 class. The estimated economic effect of such

морозостойкостью, соответствующей марке F21000. Ориентировочные экономический эффект от такой замены определяется пониженной стоимостью указанных элементов конструкций из сверхвысокопрочного сталефибробетона в сравнении со стальными.

a replacement is determined by the reduced cost of these elements of structures made of ultra-high performance fiber reinforced concrete in comparison with steel.

Ключевые слова:
Предварительное напряжение, сверхвысокопрочный сталефибробетон, усиление мостов

Keywords:
Bridge superstructures strengthening, prestressing, post-tensioning, ultra-high performance fiber reinforced concrete

1. Введение

Свервысокопрочный сталефибробетон (СВФБ) – это относительно новый вид композиционного материала на основе цемента, который, помимо сверхвысоких прочностных характеристик, обладает сверхнизкой проницаемостью и, соответственно, высокой долговечностью. Основной особенностью СВФБ, отличающего его от бетона обычной прочности или высокопрочного бетона, является однородная мелкодисперсная структура матрицы, которая предопределена повышенным содержанием вяжущего, под которым подразумеваются цемент и высокоактивные микронаполнители, отсутствием крупного заполнителя, и низким водо-вяжущим отношением (В/В), которое обеспечивается повышенным содержанием суперпластификатора [7]. Для улучшения прочностных характеристик на изгиб, растяжение при изгибе и осевое растяжение, мелкодисперсная высокопрочная матрица армируется стальными волокнами – фиброй, которая, способствует повышению прочности на растяжение и, соответственно, трещиностойкости [8]. Представленные преимущества СВФБ позволяют предположить целесообразность его применения в конструкциях, эксплуатируемых в агрессивных средах, с повышенными динамическими и изгибающими нагрузками.

Целью опытного применения СВФБ являлась оценка возможности замещения стальных упоров преднапряженных конструкций балок и стен резервуаров на бетонные. Информация о зарубежном опыте применения таких фибробетонов в транспортном строительстве это подтверждает [9].

Следует отметить, что технология получения СВФБ, предлагаемая НИИЖБ им А.А. Гвоздева, отличается от зарубежных аналогов особенностями используемых компонентов [6], что делает этот новый вид бетонов более экономичным. Впервые разработанный в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева СВФБ использован для изготовления упоров преднапряженных конструкций пролетного строения – сборной железобетонной балки автодорожного путепровода на км 1002 автодороги М-4 «Дон» и стен резервуаров диаметром 50 м в г. Волжске, Республика Марий Эл.

Характеристики конструкций, условия их усиления и изготовления упоров приведены далее.

2. Свойства бетонной смеси и бетона

Состав СВФБ для производства упоров был определен по результатам ранних исследований [1, 6], которые позволили оценить влияние компонентов бетона на реологические свойства свежеприготовленной бетонной смеси (удобоукладываемость и сегрегационная устойчивость), а также на физико-механические свойства (прочность на сжатие, растяжение при изгибе, осевое растяжение, начальный и динамические модули упругости, деформативность и морозостойкость).

Для изготовления фибробетонных упоров на лабораторном оборудовании НИИЖБ им. А.А. Гвоздева и ООО «Предприятие Мастер Бетон» было изготовлено 0,5 м^3 СВФБ из самоуплотняющейся фибробетонной смеси.

Изготовление фибробетонных упоров производилось в два этапа. На первом этапе было заформовано 12 упоров объемом 0,18 м^3 для усиления сборной железобетонной балки автодорожного путепровода на км 1002 автодороги М-4 «Дон». На втором этапе было заформовано 20 упоров объемом 0,32 м^3 для усиления двух резервуаров-отстойников диаметром 50 м в г. Волжске Республики Марий Эл. Общий вид фибробетонных упоров представлен на рис. 1.

Рис. 1. Общий вид фибробетонных упоров после распалубки

Из фибробетонных смесей на каждом этапе было изготовлено 6 образцов-кубов размером 100×100×100 мм для определения прочности при сжатии в возрасте 3, 7 и 28 суток, 4 образца-призмы размером 70×70×280 мм для определения прочности на растяжение при изгибе в возрасте 7 и 28 суток, а также 4 образца-галтели с размером рабочего сечения 70×70 мм для определения прочности на осевое растяжение в возрасте 7 и 28 суток. Общий вид заформованных образцов представлен на рис. 2.

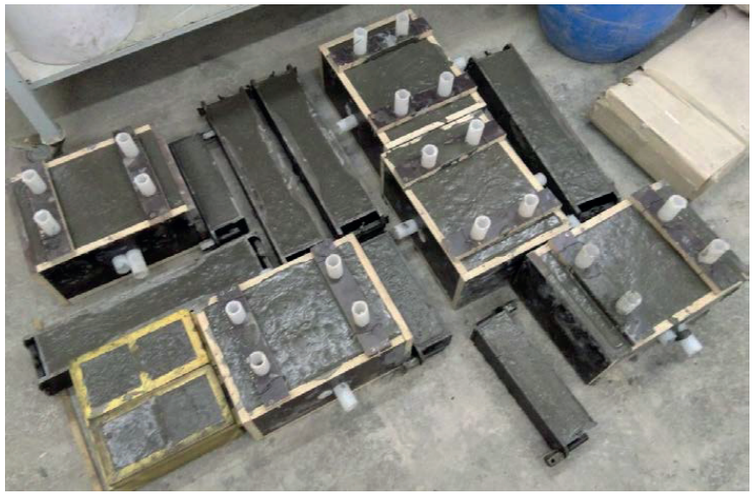

Рис. 2. Общий вид заформованных образцов

Определение пределов прочности проводилось в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Все образцы до испытаний хранили в камере нормального твердения с температурно-влажностным режимом (t = 20±2 °C, W = 98%) в соответствии с ГОСТ 10180.

Удобоукладываемость фибробетонных смесей, определенная по расплыву нормального конуса (РК) в соответствии с ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», находилась в диапазоне 670-730 мм, что позволяет отнести их к категории самоуплотняющихся.

Средняя прочность на сжатие составила 152,3 МПа для упоров на первом этапе и 150,6 МПа для упоров на втором этапе работ. Средняя прочность на растяжение при изгибе составила 21,3 МПа для упоров на первом этапе и 20,6 МПа для упоров на втором этапе работ. Средняя прочность на осевое растяжение составила 8,46 МПа для упоров на первом этапе и 8,54 МПа для упоров на втором этапе работ.

Результаты определения прочностных параметров СВФБ представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Физико-механические характеристики СВФБ для фибробетонных упоров на первом этапе работ

Дата изготовления	Возраст, сут	Средняя плотность, кг/м³	Прочность бетона на сжатие, МПа		Прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа		Прочность бетона на осевое растяжение, МПа	
			Единичные значения	Среднее значение	Единичные значения	Среднее значение	Единичные значения	Среднее значение
19.11.18	3	2447	111,5 109,9	110,8	-	-	-	-
	7	2439	134,3 136,5	135,4	17,4 18,2	17,8	7,43 7,51	7,47
	28	2467	151,2 153,3	152,3	21,8 20,7	21,3	8,50 8,41	8,46

Таблица 2

Физико-механические характеристики СВФБ для фибробетонных упоров на втором этапе работ

Дата изготовления	Возраст, сут	Средняя плотность, кг/м³	Прочность бетона на сжатие, МПа		Прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа		Прочность бетона на осевое растяжение, МПа	
			Единичные значения	Среднее значение	Единичные значения	Среднее значение	Единичные значения	Среднее значение
14.05.19	3	2441	106,2 106,6	106,4	-	-	-	-
	7	2457	130,3 132,3	131,3	16,9 17,7	17,3	7,62 7,58	7,60
	28	2461	150,2 151,0	150,6	20,7 20,4	20,6	8,67 8,41	8,54

3. Реализованные проекты

3.1 Усиление балки путепровода

Первым реализованным примером использования в России СВФБ для несущих мостовых конструкций можно считать усиление сборной железобетонной балки автодорожного путепровода на км 1002 автодороги М-4 «Дон».

На автодорожном путепроводе автодороги М-4 «Дон» по проекту АО «ИТП» (ГИП Марченко М.С.) предстояло усилить 44 автодорожные балки длиной 18 м. Усиление выполняли с помощью внешнего предварительно-напряженного армирования, принципы которого и возможности для автодорожного и железнодорожного мостового строительства известны инженерной общественности [2].

Для анкеровки концов напрягаемой арматуры усиления в 43 балках было предусмотрено распространенное техническое решение, основанное на использовании стальных сварных упоров (фото установленных упоров приведено на рис. 3).

Рис. 3. Фото установленных стальных упоров

Как видно из рис. 3, стальной упор является сложным составным изделием, для производства которого необходимо выполнить трудоемкие операции механической обработки и сварки.

Для одной балки (была выбрана наименее нагруженная крайняя балка в сечении) проектом было предусмотрено опытно-экспериментальное применение упоров из СВФБ в количестве 4 шт. на балку. Форма упора была выбрана наиболее простой из возможных, для акцентирования внимания на отсутствие сложных технологических операций по изготовлению. Крепление к балке предусмотрено с двух сторон на высокопрочных шпильках с контролируемым усилием натяжения, т. е. накладные упоры работают на сдвиг за счет сил трения между стенкой балки и гранями упора (рис. 4).

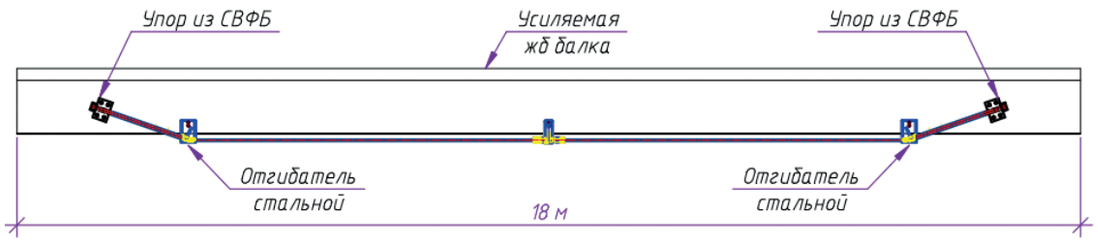

Рис. 4. Схема усиления мостовой балки длиной 18 м

Специалистами АО «ИТП» были выполнены расчеты упора из СВФБ в пространственной постановке с применением объемных конечных элементов. В связи с отсутствием национальных норм для материалов такого класса расчетные характеристики были взяты «в запас» как для бетона кубиковой прочностью на сжатие 140 МПа из швейцарских рекомендаций [3]. Принимая во внимание опытный характер мероприятия, работа упоров была ограниченна упругими деформациями.

По результатам расчета были обоснованы принятые геометрические характеристики упора, а также было принято решение об опирании обоймы анкера фирмы СТС непосредственно на упор, без опорной стальной плиты, что значительно снизило стоимость и сроки изготовления упора в дальнейшем.

3.2. Проведение натурных испытаний

Учитывая опытно-экспериментальный характер конструкции, было принято решение о проведении натурных испытаний упоров на сдвиг. Согласно разработанной программе планировалось испытать 8 упоров.

Натурные испытания были выполнены на специальном стенде в лаборатории АО «ИТП» совместно со специалистами ООО «СТС», НИИЖБ им. А.А. Гвоздева и ООО «Предприятие Мастер Бетон» (рис. 5).

Усилие натяжения высокопрочных шпилек было подобрано, исходя из коэффициента трения между бетоном балок и упором, равного 0,6. Усилия на домкратах были доведены до значения разрыва канатов, выдержаны в течении 30 мин, и далее канаты были доведены до разрыва. После этого упоры были обследованы и сделан вывод, что ни один из 8 упоров не получил смещений.

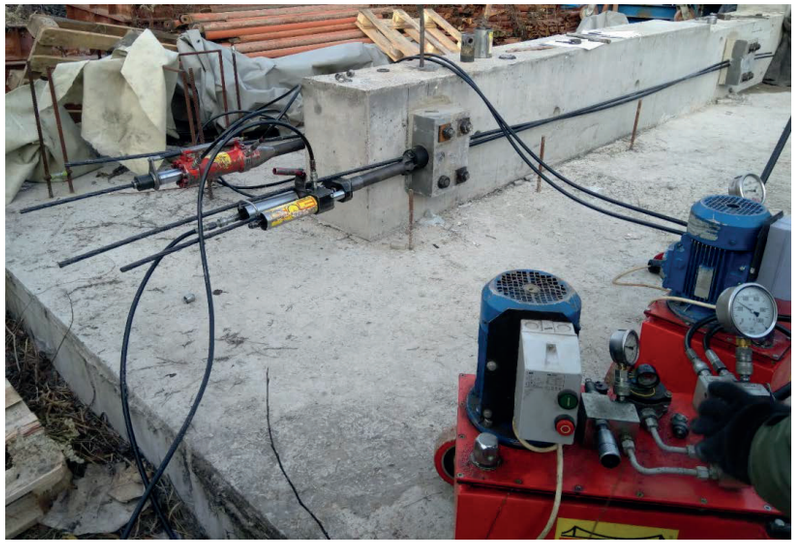

Рис. 5. Общий вид стенда натурных испытаний

Таким образом, учитывая, что расчетные усилия на упоры по проекту составляют не более 56% от разрывного, надежность упоров по результатам испытаний обеспечена с коэффициентом «запаса» 1,78.

На основании успешных испытаний 4 дополнительно изготовленных упора из СВФБ со средней кубиковой прочностью на сжатие 152,3 МПа были установлены в 2018 г. на объекте и показывают надежную работу (рис. 6).

Рис. 6. Упор из СВФБ на балке после натяжения

Достоинства накладных анкеров (упоров) из СВФБ – это, в первую очередь, простота и сроки изготовления, готовность материала к восприятию нагрузки уже на 3 сутки (набор

более 70% прочности) и, как следствие, общее снижение стоимости работ по усилению балочных пролетных строений.

3.3. Усиление резервуаров-отстойников

Вторым примером использования накладных упоров из СВФБ стали два резервуара-отстойника диаметром 50 м в г. Волжске Республики Марий Эл, которые были усилены в 2019 г. внешним предварительным напряжением системой ООО «СТС» по проекту АО «ИТП» (ГИП Марченко М.С.). Для анкеровки пучков в районах технологических проходок были установлены накладные упоры из СВФБ средней прочностью на сжатие не менее 150 МПа в количестве 20 штук на два резервуара.

Схема расположения накладных упоров на стенах резервуара и общий вид приведены на рис. 7 и 8.

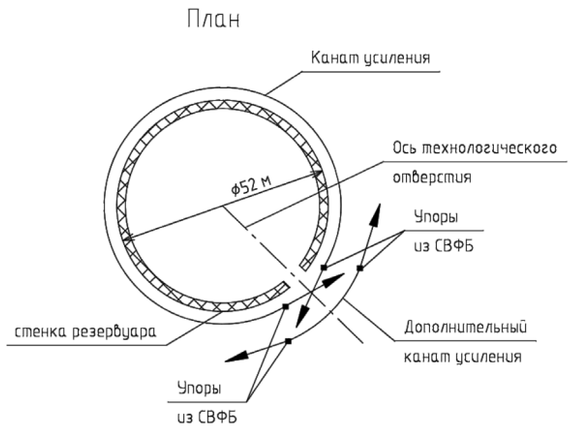

Рис. 7. Схема усиления резервуаров в районе технологического отверстия

Рис. 8. Накладные упоры для усиления резервуаров

Таким образом, получен успешный опыт использования СВФБ отечественного производства со средней прочностью на сжатие 150 МПа и выше, что при характерных для высокопрочных бетонов значениях коэффициента вариации (не более 10%) соответствует классам В125 и выше.

Однако трех объектов явно недостаточно для убеждения специалистов отрасли в перспективе рассматриваемого материала.

К примеру, по состоянию на 2018 г. в международной практике строительства уже было известно о более чем 20 объектах с использованием СВФБ с прочностью на 140 МПа и выше [4].

В АО «ИТП» были продолжены работы по различным вариантам применения СВФБ, в частности, разработан проект (автор Марченко М.С.) на пролетное строение длиной 33 м из СВФБ со средней прочностью на сжатие 140 МПа, которое имеет хорошие экономические показатели по сравнению с имеющимися проектами автодорожных балок [5]. В частности, по сравнению с наиболее распространённым в настоящее время техническим решением автодорожных пролетных строений для пролетов 33 м расход СВФБ (а значит, и собственный вес) будет в 1,7 раза меньше расхода сборного и монолитного бетона, расход арматуры станет в пять раз меньше, а расход высокопрочных прядей получится в два раза меньше, что в итоге приведет к общему снижению стоимости пролетных строений не менее чем на 20% по пессимистическому прогнозу.

При этом в числе самых главных достоинств нового материала – необходимо отметить его повышенные водонепроницаемость и морозостойкость, которые составляют не менее W20 и $F_2$1000 соответственно, что несомненно снизит эксплуатационные затраты и повысит экономическую целесообразность пролетных строений из СВФБ. Если же совсем отказаться от гидроизоляции, защитного слоя и нижнего слоя асфальтобетонного покрытия, заменив перечисленные слои на слой СВФБ толщиной 25-40 мм, то экономия будет гораздо более значительной.

4. Выводы

Перспективы применения СВФБ очевидны как при производстве простых изделий типа упоров, так и более сложных балочных конструкций.

Существует потребность в проведении дополнительных исследований и научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) для разработки нормативной документации, необходимой для проектирования конструкций и сооружений.

Также для запуска массового применения необходимо увеличивать количество опытных объектов с эксплуатацией в России.

Список литературы

1. *Каприелов С.С., Чилин И.А.* Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28-30.

2. *Каптелин С.Ю., Марченко М.С.* Предварительное напряжение балочных пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 2020. №9. С.25-28.

3. Recommendation: Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cement-based composites (UHPFRC) Construction material, dimensioning and application. Swiss Federal Institute of Technology – Switzerland – 2016.

4. *Mi Zhou, Wei Lu, Jianwei Song, George C. Lee.* Application of Ultra-High-Performance Concrete in bridge engineering // Construction and Building Materials, 2018, no.186, pp. 1256-1267.

5. *Марченко М.С.* Первый опыт и перспективы применения отечественного сверхвысокопрочного сталефибробетона в автодорожных мостовых сооружениях // Автомобильные дороги. 2020. №10. С.48-50.

6. *Чилин И.А.* Влияние технологических факторов на свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник НИЦ «Строительство». Бетон и железобетон – проблемы и перспективы: Сб. статей. Вып. 4(27). – М.: АО «НИЦ «Строительство». 2020. С. 135-147.

7. *Habel K., Viviani M., Denarie E., et al.* Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) // Cement and Concrete Research, 2006, no. 36, pp. 1362-1370.

8. *Hassan A.M.T., Jones S.W., Mahmud G.H.* Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) // Construction and Building Materials, 2012, no.37, pp. 874-882.

9. AFGC Recommendations on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) // AFGC's Scientific and Technical Committee, Revised edition – 2013 – France. 358 p.

Информация об авторах/Information about authors

Максим Сергеевич МАРЧЕНКО, инженер АО «Институт Технологий Преднапряжения»,
Maxim MARCHENKO, civil engineer, "Institute of Post-tensioning Technologies" JSC,
e-mail: mms2000@inbox.ru

Игорь Анатольевич ЧИЛИН, инженер лаборатории химических добавок и модифицированных бетонов НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.
Igor CHILIN, engineer of laboratory of chemical additives and modified concrete, NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: pgsnik87@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-75-91

Никита Михайлович СЕЛЮТИН, старший инженер, ООО «Предприятие Мастер Бетон»
Nikita SELYUTIN, senior engineer "Master Concrete Enterprise" PSC
e-mail: 89165046672@mail.ru

УДК 666.972:691.620.192
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-51-55

ИЗМЕНЕНИЯ В СВОДЕ ПРАВИЛ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА С ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

CHANGES IN THE CODE OF RULES FOR THE DESIGN OF STRUCTURES MADE OF CONCRETE WITH POLYMER COMPOSITE REINFORCEMENT

Т. А. МУХАМЕДИЕВ, д-р техн. наук

В статье представлены сведения об изменениях, внесенных в свод правил по проектированию конструкций из бетона, армированных полимерной композитной арматурой. Изложены новые указания по нормированию относительных деформаций в базовой точке двухлинейной диаграммы бетона при осевом растяжении, используемой для расчета железобетонных элементов по второй группе предельных состояний. Представлены правила расчета переармированных конструкций таврового с полкой в сжатой зоне и двутаврового сечений методом предельных усилий. Уточнены указания по учету неупругих свойств бетона растянутой зоны при определении упругопластического момента сопротивления для крайнего растянутого волокна бетона сечения прямоугольной формы и тавровой формы с полкой, расположенной в сжатой зоне.

The article presents information about the changes made to the code of rules for the design of concrete structures reinforced with polymer composite reinforcement. New rules for the formation of relative deformations at the base point of a two-line diagram of concrete under axial tension, used to calculate reinforced concrete elements for the second group of limit states, are described. The rules for calculating re-reinforced structures of T-or I-beam cross-sections with a shelf in a compressed zone by the method of limiting forces are presented. The rules for taking into account the inelastic properties of concrete of the stretched zone when determining the elastic-plastic moment of resistance for the extreme stretched fibre of concrete with a rectangular cross-section and a T-shape with a shelf located in the compressed zone are clarified.