

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В статье рассмотрены преимущества сталефибробетонных конструкций, особенности их изготовления и расчета по предельным состояниям при различных видах воздействий.*

**Ключевые слова:** фибра, фибробетон, сталефибробетон.

**Введение.** Примерно с середины XIX века, с тех пор как появился первый бетон, появились и первые добавки к нему, основная часть которых употреблялась для увеличения прочности бетона, другие – для улучшения внешнего вида. Так и был изобретен фибробетон.

В 1874 г. английский строитель А. Берард запатентовал добавку к бетону, представляющую собой неоднородную смесь различных материалов. В 1918 г. во Франции Х. Альфсен изобрел метод армирования при помощи стальных или деревянных волокон. Через 25 лет в Великобритании был получен первый фибробетон. В 1976 г. его впервые применили в СССР при строительстве взлетно-посадочной полосы аэродрома. Но тогда этот материал не получил у нас в стране широкого развития, главным образом потому, что и технологии его изготовления, и сама фибра были далеки от совершенства.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** Все несущие конструкции из бетона армируются металлом для увеличения прочности. Именно этот принцип положен в основу изготовления фибробетона. Фибробетон – это смесь, содержащая щебень, песок, цемент, воду, а также металлические или полипропиленовые волокна фибры [1].

В качестве армирующего материала используется так называемая фибра – специальная мелкая металлическая или стальная стружка, а также стекловолокно, пропиленовое волокно или другие материалы [2, 3]. Фибра добавляется в бетон на стадии его формирования и придает ему новые свойства. По сравнению с обычным бетоном фибробетон имеет ряд преимуществ:

- прочность на сжатие, растяжение и изгиб (характеризует материал в плане сопротивления другим воздействиям);
- высокая ударная прочность (она примерно в 3–5 раз выше, чем ударная прочность обычного бетона);
- долговечность (предположительно в 15–20 раз выше);
- повышенная морозостойчивость;
- высокая водонепроницаемость;
- повышенная трещиностойкость;
- истираемость;
- огне- и взрывостойкость.

Это и обуславливает растущую популярность данного композиционного материала, позволяет изготавливать тонкостенные строительные конструкции, значительно экономить на материалах, понижать материалоемкость и повышать эффективность строительного процесса.

**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.** Сталефибробетон является перспективным строительным материалом. Для широкого использования в строительстве необходимо дальнейшее изучение его свойств с различными фибрами, усовершенствование технологии изготовления и методов расчета.

**Постановка задачи.** В данной статье рассмотрим виды сталефибробетонных конструкций с различными наполнителями, технологии их изготовления, область применения и методики расчета при различных видах деформаций.

**Основной материал и результаты.** Сталефибробетон является разновидностью дисперсно-армированного железобетона и изготавливается из тяжелого или мелкозернистого бетона (бетон-матрица), в котором в качестве арматуры используются стальные фибры, дисперсно и равномерно распределенные по объему бетона. Совместная работа бетона и стальных фибр обеспечивается сцеплением по их поверхности, анкеровкой фибры в бетоне за счет ее периодического профиля, кривизны в продольном и поперечном направлениях, а также наличием анкеров на концах фибр.

Сталефибробетонные конструкции зданий и сооружений могут быть различного назначения и выполняться из тяжелого или мелкозернистого бетона классов по прочности на сжатие от С20 до С60, армируемых стальной фибровой арматурой (фиброй), в том числе в сочетании со стальной стержневой арматурой. Они могут быть без предварительного и с предварительным натяжением (на упоры) стержневой арматуры и эксплуатироваться в различных климатических условиях, в различных по агрессивности средах и при различных видах нагрузок [4, 5].

Сталефибробетонные конструкции должны быть обеспечены расчетом, с требуемой надежностью, от возникновения всех видов предельных состояний.

Сталефибробетон рекомендуется применять для изготовления конструкций, в которых наиболее эффективно могут быть использованы следующие его технические преимущества по сравнению с традиционным бетоном и железобетоном:

- повышенные трещиностойкость, ударная прочность, вязкость разрушения, износо-, морозостойкость, сопротивление кавитации;
- пониженные усадка и ползучесть;
- возможность использования технологически более эффективных конструктивных решений, чем при традиционном стержневом армировании, например тонкостенных конструкций, конструкций без стержневой распределительной, косвенной или поперечной арматуры;
- пониженные трудозатраты на арматурные работы;
- повышение степени механизации и автоматизации производства конструкций;
- возможность применения новых, более производительных приемов;
- формование армированных конструкций, например торкретирование, погреб свежесформованных листовых изделий, роликовое прессование и др.

Сталефибробетонные конструкции могут изготавливаться различными технологическими приемами: предварительным приготовлением смеси в заводских условиях или в бетоно-смесителях на строительном объекте, уплотнением с помощью вибрирования и вакуумирования, роликовым формованием и прессованием, торкретированием и центрифугированием.

Сталефибробетонные конструкции по виду армирования делятся на:

- фибробетонные – при расчетном армировании только фибрами, равномерно распределенными по объему элемента;
- комбинированно армированные – при их расчетном совместном армировании стальными фибрами и стальной стержневой арматурой [6].

Сталефибробетон без комбинированного армирования рекомендуется применять в элементах конструкций:

- работающих преимущественно на ударные нагрузки, смятие, истирание, воздействие кавитации;
- работающих преимущественно на сжатие при расположении продольной сжимающей силы в пределах поперечного сечения элемента;
- в остальных случаях, работающих на сжатие, при расположении продольной сжимающей силы за пределами поперечного сечения элемента, а также работающих на изгиб, когда их разрушение не представляет непосредственной опасности для жизни людей, исправности и сохранности оборудования, т.е. в случаях экономической ответственности конструкций при целесообразности фибрового армирования.

В конструкциях и элементах, подверженных действию крутящих моментов, рекомендуется применять только сталефибробетонные элементы с комбинированным армированием.

Расчет сталефибробетонных конструкций по предельным состояниям выполняется по аналогии с расчетом железобетонных и армоцементных конструкций с учетом расчетных характеристик сталефибробетона.

При расчете сталефибробетонных конструкций среднюю плотность сталефибробетона допускается принимать равной:

- 2500 кг/м<sup>3</sup> для тяжелого бетона-матрицы;
- 2400 кг/м<sup>3</sup> для мелкозернистого бетона-матрицы.

Содержание фибровой арматуры (расход фибры) в единице объема сталефибробетона определяется расчетом в соответствии с требованиями к его физико-механическим свойствам.

Расчеты сталефибробетонных конструкций производят по предельным состояниям, включающим:

- предельные состояния первой группы (по полной непригодности к эксплуатации вследствие потери несущей способности);
- предельные состояния второй группы (по непригодности к нормальной эксплуатации вследствие образования или чрезмерного раскрытия трещин, появления недопустимых деформаций и др.).

Расчеты сталефибробетонных конструкций производят с учетом возможного образования трещин и неупругих деформаций в бетоне и арматуре.

Определение усилий и деформаций от различных воздействий в конструкциях и в образуемых ими системах зданий и сооружений производят методами строительной механики, как правило, с учетом физической и геометрической нелинейности работы конструкций.

При проектировании сталефибробетонных конструкций надежность конструкций устанавливают расчетом, путем использования расчетных значений нагрузок и воздействий, расчетных значений характеристик материалов, определяемых с помощью соответствующих коэффициентов надежности по нормативным значениям этих характеристик с учетом степени ответственности зданий и сооружений.

К трещиностойкости сталефибробетонных конструкций предъявляют требования соответствующих категорий в зависимости от условий, в которых они работают, и от вида применяемой арматуры, а также величины предельно допустимой ширины раскрытия трещин:

- первая категория – не допускается образование трещин;
- вторая категория – допускается ограниченное по ширине непродолжительное и продолжительное раскрытие трещин.

Основными показателями качества бетона-матрицы, устанавливаемыми при проектировании, являются:

- класс бетона-матрицы по прочности на сжатие;
- класс по прочности на осевое растяжение (назначают в случаях, когда эта характеристика имеет главенствующее значение и ее контролируют на производстве);
- марка по морозостойкости (назначают для конструкций, подвергаемых действию попеременного замораживания и оттаивания);
- марка по водонепроницаемости (назначают для конструкций, к которым предъявляют требования ограничения водонепроницаемости).

Для сталефибробетонных конструкций рекомендуется, как правило, применять бетон-матрицу класса по прочности на сжатие не ниже С20/25. Применение бетона-матрицы более низкого класса должно быть обосновано [7].

Основными прочностными характеристиками бетона-матрицы являются нормативные значения:

- сопротивления осевому сжатию  $f_{cm}$ ;
- сопротивления осевому растяжению  $f_{ctk}$ .

Расчетные значения сопротивления бетона-матрицы осевому сжатию  $f_{cm}$  и осевому растяжению  $f_{ctk}$  определяют по формулам:

$$f_{cm} = f_{cm} / \gamma_c ; \quad (1)$$

$$f_{ctk} = f_{ctk} / \gamma_{ct} . \quad (2)$$

Основными деформационными характеристиками бетона-матрицы являются значения:

– предельных относительных деформаций бетона-матрицы при осевом сжатии и растяжении (при однородном напряженном состоянии бетона-матрицы) –  $\varepsilon_{cu}$  и  $\varepsilon_{ctu}$  ;

– начального модуля упругости  $E_{ck}$  ;

– коэффициента (характеристики) ползучести  $\varphi(t, t_0)$  ;

– коэффициента поперечной деформации бетона-матрицы (коэффициента Пуассона)  $\nu_c$  ;

– коэффициента линейной температурной деформации бетона-матрицы  $\alpha_{ct}$  .

Значения предельных относительных деформаций бетона-матрицы принимают равными:

– при непродолжительном действии нагрузки:

$$\varepsilon_{cu} = 0,003 \text{ – при осевом сжатии;} ,$$

$$\varepsilon_{ctu} = 0,00015 \text{ – при осевом растяжении;} ,$$

– при продолжительном действии нагрузки – в зависимости от относительной влажности окружающей среды.

Значения начального модуля упругости бетона-матрицы при сжатии и растяжении принимают в зависимости от класса бетона-матрицы по прочности на сжатие.

Основной прочностной характеристикой фибры является нормативное значение сопротивления растяжению  $f_{ctk}$  , принимаемое в зависимости от вида фибровой арматуры.

Расчетное сопротивление фибры растяжению для предельных состояний первой группы  $f_{ctk}$  определяется путем деления нормативного сопротивления на коэффициент надежности по фибровой арматуре  $\gamma_s$  .

Модуль упругости стальной фибровой арматуры  $E_s$  колеблется в пределах  $2,0 \cdot 10^5 \div 1,9 \cdot 10^5$  МПа в зависимости от вида фибры [8].

При комбинированном армировании нормативные и расчетные сопротивления растяжению и сжатию стержневой арматуры, коэффициенты условий работы и модули упругости этой арматуры принимают согласно рекомендациям [9].

При расчете предварительно напряженных конструкций следует учитывать снижение предварительных напряжений в стержневой арматуре вследствие потерь предварительного напряжения до передачи усилий натяжения на сталефибробетон (первые потери) и после передачи усилия натяжения на сталефибробетон (вторые потери).

Первые потери предварительного напряжения включают потери от релаксации предварительных напряжений в арматуре, от температурного перепада при термической обработке конструкций, от деформации анкеров и деформации формы (упоров).

Вторые потери предварительного напряжения включают потери от усадки и ползучести сталефибробетона.

При расчете сталефибробетонных конструкций по прочности они рассматриваются как железобетонные с фибровой арматурой, равномерно распределенной по всему объему (сечению). Расчет по прочности сталефибробетонных конструкций производится по предельным усилиям с учетом вида армирования – фибрового или комбинированного.

Расчет предварительно напряженных элементов производят для стадии эксплуатации на действие изгибающих моментов и поперечных сил от внешних нагрузок и для стадии предварительного обжатия на действие усилий от предварительного натяжения арматуры и усилий от внешних нагрузок, действующих в стадии обжатия. Расчет по прочности сталефибробетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил (внецентренное сжатие или растяжение) производят для сечений, нормальных к их

продольной оси. Расчет по прочности нормальных сечений сталефибробетонных элементов производят на основе предельных усилий.

При расчете внецентренно сжатых сталефибробетонных элементов следует учитывать влияние прогиба на их несущую способность, как правило, путем расчета конструкций по деформированной схеме.

Расчеты по предельным состояниям второй группы включают:

- расчет по раскрытию трещин;
- расчет по раскрытию трещин, нормальных и наклонных к продольной оси элемента;
- расчет по деформациям.

Расчет по закрытию трещин для сталефибробетонных конструкций не производится, по образованию трещин производят для проверки необходимости расчета по раскрытию трещин, а также для проверки необходимости учета трещин при расчете по деформациям. Расчет элементов сталефибробетонных конструкций по деформациям производят с учетом эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкциям. Расчет по деформациям следует производить на действие:

- постоянных, временных, длительных и кратковременных нагрузок при ограничении деформаций технологическими или конструктивными требованиями;
- постоянных и временных, длительных нагрузок при ограничении деформаций эстетическими требованиями.

Деформации (прогибы, углы поворота) элементов сталефибробетонных конструкций вычисляют по формулам строительной механики, определяя входящие в них значения кривизны [10].

Для обеспечения несущей способности, пригодности к нормальной эксплуатации и долговечности бетонных и сталефибробетонных конструкций помимо требований, определяемых расчетом, выполняют конструктивные требования:

- по геометрическим размерам элементов конструкций;
- по армированию (содержанию и расположению арматуры, толщине защитного слоя бетона и соединениям арматуры);
- по защите конструкций от неблагоприятных воздействий среды.

Арматура, расположенная внутри сечения конструкции, должна иметь защитный слой бетона, чтобы обеспечивать:

- совместную работу арматуры с бетоном;
- анкеровку арматуры в бетоне и возможность устройства стыков арматурных элементов;
- сохранность арматуры от воздействий окружающей среды (в том числе при наличии агрессивных воздействий);
- требуемую огнестойкость.

Толщина защитного слоя сталефибробетона назначается, исходя из требований с учетом типа конструкций, роли арматуры в конструкциях (продольная рабочая, поперечная, распределительная, конструктивная арматура), условий окружающей среды и диаметра арматуры [11].

**Выводы.** Сталефибробетон является перспективным строительным материалом, который позволяет улучшить деформативно-прочностные характеристики строительных изделий. Проведенный обзор выявил недостаточную изученность поведения сталефибробетона в стальной обойме и при различных видах воздействий.

#### *Литература*

1. *Ракитченко, К.С. Фибробетон с использованием композиционных вяжущих и сырьевых ресурсов КМА для ремонта мостовых конструкций: дис. ...канд. ... – Белгород, 2011. – 151с.*
2. *Попов С.В. О результатах использования волокна армирующего полипропиленового в качестве фибры для изготовления бетонов [Текст] / С. В. Попов, В. Г. Брагинский //*

- Композиційні матеріали для будівництва // Вісник Донбаської ДАБА. – 2005. – Вип. 1(49). – С.35–38.*
3. *Ferreira J.P.J.G. The Use of Glass Fiber-Reinforced Concrete as a Structural Material Techniques / J.P.J.G. Ferreira and F.A.V. Branco // Experimental Techniques May/June 2007 – P. 64–73.*
  4. *Сталефібробетонные конструкции зданий и сооружений. Строительные конструкции / ВНИИТПИ. – М., 1990.*
  5. *ТУ У 28.7-05393145-004:2005. Фибра стальная с анкерами для армирования бетона и торкретбетона [Текст]. – Днепрпетровск, 2005.*
  6. *Aftab Mufti. Innovative, Intelligent Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymer (Frp) Materials / Aftab Mufti // CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan. – 2007. – P. 403–414.*
  7. *ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу.*
  8. *Luca G. Sorelli. Steel Fiber Concrete Slabs on Ground: a Structural Matter / Luca G. Sorelli, Alberto Meda, and Giovanni A. Plizzar // ACI Structural Journal. – 2006. – № 7–8. – P. 551–558.*
  9. *Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций и технологии производства сталефибробетона с применением стальной фибры БМЗ: Р5.03.054.09. – Мн.: РУП «Институт БелНИИС», 2009. – 106 с.*
  10. *Чихладзе Э.Д. Строительная механика [Текст] / Э. Д. Чихладзе. – Х: УкрГАЗТ, 2011. – 320 с.*
  11. *Brown R. Fiber Reinforcement of Concrete Structures / R. Brown, A. Shukla and K.R. Natarajan // University of Rhode Island. – 2002. – P. 55.*

*А.О. Берестянська, інженер  
Н.М. Гаврилко, студент  
І.В. Биченок, студент*

*Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків*

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Розглянуто переваги сталефібробетонних конструкцій, особливості їх виготовлення і розрахунку за граничними станами при різних видах впливів.*

**Ключові слова:** *фібра, фібробетон, сталефібробетон.*

*A.A. Berestianska, engineer  
N.M. Gavrilkpo, student  
I.V. Bychenok, student*

*Ukrainian State Academy of Railway Transport*

## **CALCULATIONS AND DESIGN FEATURES OF STEEL-FIBRO-CONCRETE STRUCTURES**

*The advantages of steel-fibro-concrete structures together with their manufacturing and limited stress calculation under the different loads were described in the article.*

**Keyword:** *fibre, fibrous concrete, steel-fibro-concrete.*

*Надійшла до редакції 17.10.2014*

*© А.А. Берестянская, Н.Н. Гаврилко, И.В. Быченко*