

Введение При использовании в строительстве ответственных конструкций из бетонов классов В30-В50, на первый план выдвигается девиз «экономить бетон в конструкциях, а не цемент в бетоне». Это связано, с одной стороны, увеличением нагрузок на такие конструкции, а с другой постоянно возрастающими требованиями ресурса энергосбережения при производстве современных цементных композитов. Достичь этого можно, например, за счет уменьшения поперечных сечений конструкций благодаря применению высокопрочных бетонов. Однако традиционные высокопрочные бетоны, например, мелкозернистые, имеют ряд недостатков: низкую прочность на растяжение при изгибе и повышенный расход цемента. Последнее способствует росту усадочных деформаций и внутренних напряжений, накоплению микродефектов, вызывающих опасность хрупкого разрушения конструкций. Одним из перспективных видов высокопрочного бетона, устраняющего указанные выше недостатки, является фибробетон, который рассматривается как композиционный материал, состоящий из цементной матрицы с равномерным или заданным распределением по ее объему ориентированных или хаотично расположенных дискретных волокон различного происхождения [1,2-4]. Предпочтение отдается стальным фибрам и сталефибробетону (далее СФБ), поскольку стальная арматура имеет высокий модуль упругости, практически одинаковый с бетоном коэффициент линейного температурного расширения, хорошую стойкость к коррозии в бетоне и т.д. [5,6]. В большинстве случаев применение стальной фибры намного эффективнее традиционного армирования бетона. Равномерное распределение фибры в бетоне способствует формированию трехмерной силовой структуры, позволяющей выдерживать растягивающие усилия, направленные в разные стороны, и препятствующей образованию и дальнейшему развитию трещин, образующихся от нагрузок и увлажнения бетона. Мировая практика строительства выдвинула СФБ как один из перспективных строительных материалов XXI века. Опыт США, Германии, Японии, Великобритании, Франции, Италии и Австралии убедительно показал технико-экономическую эффективность его применения в строительных конструкциях и сооружениях. Сегодняшний рынок представлен большим количеством зарубежных производителей стальной фибры, таких как MIXARM, FIBAX, DUROCEM, MACCAFERRI WIRAND, HENDIX, TWINFLAT, BEKAERT и производителей их отечественных аналогов, продукция которых является значительно дешевле импортных марок. Производители фибры из Украины и Белоруссии занимают около 40% рынка в европейской части России. Производство фибры в России составляет более 10 тысяч тонн и с каждым годом эта цифра растет, что доказывает высокую технико-экономическую эффективность ее применения. Несмотря на имеющийся широкий опыт производства СФБ в мире, в РФ он никак не может найти достойного применения в строительной отрасли. Это связано, по мнению авторов, во-первых,

инертностью строительной промышленности; во-вторых, осторожностью проектировщиков при использовании материалов и конструкций с дисперсным армированием; в-третьих, дороговизной отечественной и зарубежной фибры; в-четвертых, отсутствия эффективной технологии и оборудования для введения различных видов фибры в состав бетонной смеси, обеспечивающих равномерность ее объемного распределения; в-пятых, необходимостью дополнительного длительного перемешивания бетона после введения фибры. Тем не менее, благодаря повышенной прочности, трещино-, ударо- и износостойкости фибробетона [1,7-10], способствующих увеличению срока службы конструкций из него, удлинению межремонтных периодов и снижению затрат на их эксплуатацию, а также возможности использования технологически более эффективных конструктивных решений, чем при традиционном стержневом армировании, повышения степени механизации и автоматизации производства конструкций, возможности применения новых, более производительных приемов формования армированных конструкций интерес к данному виду бетона не ослабевает. Указанные преимущества СФБ широко используют за рубежом в дорожном строительстве, при сооружении автотранспортных тоннелей и развязок, тоннелей метро, строительстве морских платформ и плотин, в устройстве полов промышленных зданий, терминалов и т.п. Считается целесообразным применение СФБ в каркасных конструкциях зданий, особенно при возможных сейсмических воздействиях. Наиболее интересными примерами применения СФБ являются конструкции перегонных тоннелей метрополитена в Осло (Норвегия); крепь гидротехнического тоннеля диаметром 2,34 м в Карсингтоне (Великобритания); тоннель Хеггура и газопроводные тоннели под дном Северного моря (Норвегия); метрополитены в Гамбурге (ФРГ), Лионе (Франция), в Штутгарте (ФРГ) и в Осло (Норвегия); автодорожный тоннель близ Кобленца (ФРГ); автодорожный тоннель «Энасан-2» протяженностью 6,63 км на глубине до 1 км (Япония). Однако, несмотря на наличие ряда разработок СФБ, опубликованные экспериментальные данные к настоящему времени характеризуются большим разбросом показателей из-за многообразия используемых видов фибры, их геометрии, свойств, а также технологических режимов приготовления конструкций. Поэтому в каждом частном случае производства дисперсноармированных цементных композитов требуется дополнительная лабораторная и промышленная отработка составов и технологических режимов. Кроме того, подбор приемлемых параметров СФБ во многом обусловлен наличием или отсутствием экспериментальных данных по конкретному виду фибры и характеристиками используемого состава бетона и смеси. Цель работы исследовать влияние одноуровневого армирования стальной фиброй производства НПО «Магнитогорск Фибра-Строй», полученной резкой листа, на прочностные показатели высококачественного бетона-матрицы класса В45, применяемого для производства высокоточных железобетонных блоков

обделки перегонных тоннелей Казанского метро. В качестве основного параметра СФБ были выбраны прочность при сжатии и на растяжение при изгибе. Обычно расчетное сопротивление СФБ сжатию – R_{fb} может превысить призмennую прочность исходного бетона – R_b от 40% до 2-х раз. Рост прочности на растяжение при изгибе B_{ftb} является одним из важных показателей СФБ, который зависит от содержания фибры и её длины, прочности её сцепления с бетонной матрицей, класса бетонной матрицы и может превышать прочность исходного бетона в 3,5-5 раз. Обоснование выбора исходных материалов

Выбор материалов для подбора состава бетона-матрицы класса В45 и СФБ осуществляли согласно требованиям [8,11]. Применялись следующие материалы: портландцемент, стальная фибра, щебень из плотных пород, гравий дробленый, песок речной, добавки. Для обеспечения высоких физико-механических свойств бетона-матрицы особое внимание при контроле качества исходных материалов уделялось следующим характеристикам: для цемента содержание С3S в пределах 55-60%, С3А не более 5%, содержание щелочей не более 0,8%, удельная поверхность порядка 280-350 м²/кг, рекомендуется использовать бездобавочные цементы нормированного состава с индексом «Н»; для крупного заполнителя – щебня (гравия): полифракционность, марочная прочность не менее 140 МПа, содержание зерен лещадной формы не более 15%, содержание пылевидных и глинистых частиц не более 3%; для мелкого заполнителя – модуль крупности песка 2,5-3, содержание пылевидных и глинистых 3%; для добавок – обеспечение низкого В/Ц (не более 0,4), ускоренное твердение бетона в первые часы, набор проектной прочности при мягких режимах ТВО. Особые требования предъявлялись к выбору стальной фибры. Стальная фибра производится четырьмя способами: фрезерованием из слябов, рубки из листового проката и проволоки, получения фибры из расплава. Для производства волокна из сляба или блюмса используется более дешевое исходное сырье полуфабрикат сталепрокатного производства. Такая фибра не образует «ежей» при транспортировке и перемешивании и легко вводится в смеситель. Однако полученное волокно отличается значительным непостоянством геометрических размеров и неоднородностью физико-механических свойств. Кроме того, оборудование для производства таких волокон имеет высокую стоимость и большую энергоемкость. Фибра, получаемая путем рубки из стального листа толщиной 0,4-0,8мм, отличается достаточной стабильностью геометрических размеров и высокой однородностью по прочности (низкий коэффициент вариации по прочности 5-6%), хорошими технологическими свойствами и повышенной, по сравнению с исходным материалом, прочностью (за счет наклепа и устройства анкеров на концах фибр, ее предел прочности возрастает на 25-30%). Кроме того, среди всех видов стальной фибры волокна из листа обладают самым высоким коэффициентом использования материала волокна при разрушении, равным 80 % для фибры без анкера и 100 % для фибры с

анкером. Для сравнения этот показатель для фибры из сляба равен соответственно 40 и 80%, для волокна из проволоки 20 и 62%. Способ получения фибры путем ее экстрагирования из расплава металла отличается наиболее низкой стоимостью исходного сырья. Однако из-за сложной технологии изготовления такой фибры она получается самой дорогой из представленных четырех типов. В связи с этим, фибра из расплава большого применения в монолитном строительстве не имеет и в основном применяется для специальных бетонов, например, для армирования бетона теплостойких конструкций. Наибольшее влияние на свойства сталефибробетона оказывают геометрические характеристики фибры, способ ее введения в бетонную смесь, уровень сцепления фибр с бетоном. Особое значение имеет параметр, который специалисты называют геометрическим фактором, характеризуемый отношением длины фибры (l) к ее диаметру (d). Рабиновичем Ф.Н. [12] установлено влияние степени армирования (m_{fv}) стальной фибры ($d \times l = 0,25 \times 25,4$ мм) на объем нагрузки в момент образования первой трещины. При $m_{fv} = 2,3\%$ объем нагрузки в два раза меньше, чем при $m_{fv} = 4\%$. Курбатов Л.Г. [13,14] доказал, что уменьшением геометрии фибры от $(0,3 \times 25)$ мм до $(1,2 \times 120)$ мм объем нагрузки до первой трещины может быть увеличен в 1,25 раз при одинаковом содержании ($\mu_0 = 2\%$) волокон в бетоне. В работах [1,9] доказано влияние геометрии фибры на размер начальной ширины трещины при нагружении бетона. При диаметре фибры 0,3 мм начальный размер трещины составлял 1-3 мкм, а при диаметре 0,9 мм – от 7 до 10 мкм. Кроме того, отмечается влияние размера заполнителя (песка, щебня) бетона на предел трещиностойкости СФБ: чем больше размер заполнителя (вместо мелкозернистого бетона применять бетон на щебне), тем меньше трещиностойкость композита при прочих равных условиях. Поэтому рекомендуется применять при дисперсном армировании стальной фиброй мелкозернистый бетон или использовать щебень с максимальным размером до 10 мм. Согласно п. 6.1.9. [8] при техническом обосновании допускается применение щебня с размером до 20 мм с ограничением содержания фракции 10-20 мм в количестве до 25% по массе. Анализ работ по СФБ показывает, что наибольшую эффективность проявляют стальные фибры диаметром 0,3...0,8 мм, а оптимальное отношение длины к диаметру должно быть в пределах от 50 до 100. Это связано с тем, что тонкие фибры создают фиброкаркас с мелкими ячейками, которые трудно заполнить бетонной смесью. Для изготовления сталефибробетона по технологиям с отдельной укладкой компонентов рекомендуется использовать фибру диаметром 0,5...0,7 мм. Если $l/d \leq 50$, что характерно для коротких фибр, то такие фибры удобны для изготовления сталефибробетонных композитов способом совместного перемешивания ингредиентов смеси и не пригодны для способа отдельной укладки, так как они в бетоне не образуют заданной формы фиброкаркас. В другом случае, если $l/d > 75$, то фибры практически

образовывают фиброкаркас с ячейками, в которых могут «упаковываться» частицы щебня и песка. При этом желательно лучше использовать щебень фракции не более 5-10 мм. При производстве высокопрочного бетона в РФ наиболее широко применяется щебень фракции 5-20 мм. Не смотря на это, на ряде заводов ЖБИ и КПД для различных целей, например, для производства тонкостенных ж/бетонных конструкций, вынуждены создавать линии для дополнительного дробления и отсева щебня на фракции 5-10 и 10-20 мм.

Экспериментальная часть. После изучения рынка исходных материалов для бетона-матрицы и анализа их свойств, а также, учитывая транспортные расходы на их доставку, были предложены и испытаны контрольные пробы следующих материалов. Цемент: Вольский портландцемент марки 500 ПЦ 500-ДО-Н ГОСТ 10178-85. Данные испытания основных свойств отобранных проб, соответственно: средняя активность в возрасте 3 и 28 суток – 33,8 и 54,5 МПа; нормальная густота – 24%; сроки схватывания: начало – 145 мин, конец 200 мин; минералогический состав: C3S 64, C2S – 17, C3A – 4, C4AF – 15%; тонкость помола – 10,5%; содержание SO₃ -2,28%. Крупные заполнители: были отобраны гранодиоритовый щебень Саткинского (Урал) месторождения и дробленый гравий с ОАО «Кулонстрой» (г. Казань). Для щебня: плотность породы в куске 2600-2700 кг/м³, водопоглощение менее 0,35%, морозостойкость более F300, марка щебня по дробимости 1400, потеря массы при дробимости 7,5%; содержание зерен слабых пород 2,5%; соотношение фракции 5-10мм и 10-20 мм в пределах 33:67 %; содержание лещадки менее 15%, содержание глинистых и пылевидных частиц в норме. Месторождение гранитного щебня залегает за пределами РТ, поэтому их использование в бетонах способствует увеличению себестоимости в связи с высокими транспортными расходами на их доставку. Более экономичным является использование в качестве крупного заполнителя дробленого гравия производства ОАО «Кулонстрой», испытания которого производили по ГОСТ 8267-93 и ГОСТ 26633-91. Данные испытания: насыпная плотность влажного – 1470кг/м³, сухого – 1600кг/м³, потери массы при дробимости – 5%, марка по прочности 1000, содержание пылевидных и глинистых – 0,4%, содержание слабых пород – 2,2%, группа по форме зерен -1. Морозостойкость – F150 по ГОСТ 8267-93. Содержание растворимого в щелочах кремнезема – 111,7 ммоль/л; величина относительной деформации расширения образцов на щебне из гравия, установленной по результатам ускоренного метода (ГОСТ 8269.0-97), составила 0,068% при норме не более 0,1%. Мелкий заполнитель: песок обогащенный с ООО КНМ «Лесная гавань» (Казань); средний по показателю модуля крупности (Мкр 2,5); содержание пылевидных и глинистых – менее 3%; органика – отсутствует; насыпная плотность – 1530-1560 кг/м³; истинная плотность – 2630 кг/м³. Добавки – суперпластификатор С-3 (Первоуральск). Согласно ТУ 6-36-0204229-625-90 в С-3 содержание активного вещества не менее 69 %, содержание золы не более 38 %, pH (2,5 %-ного

водного раствора) 7-9, содержание воды не более 10 %. Фибра для лабораторных и промышленных исследований со склада готовой продукции НПО «Магнитогорск Фибра-Строй» было отобрано 200 кг стальной фибры длиной 40 мм и толщиной 0,4 мм. Модуль упругости фибры 2,0 105 МПа. Наиболее ответственной операцией в технологическом процессе приготовления сталефибробетонных смесей является этап введения в приготавливаемую смесь фибры, обеспечивающий их равномерное распределение в объеме матрицы. Известно, что однородность смеси зависит от ряда факторов: размеров фибры, отношения ее длины к диаметру l_f/d_f , марки сталефибробетонной смеси, класса бетона-матрицы, коэффициента объемного армирования μ_{fv} , последовательности ввода компонентов и режима перемешивания сталефибробетонной смеси, способа подачи стальных фибр в смеситель, типа используемого смесителя. Несмотря на важность вышеуказанных факторов, при прочих равных условиях решающее влияние на прочность свойства сталефибробетона оказывает коэффициент объемного армирования (μ_{fv}). Для оценки ее влияния на прочность дисперсно-армированного бетона-матрицы при сжатии и изгибе, стальную фибру вводили в количестве от 0,5 до 1 % по объему. При выборе режима последовательности подачи ингредиентов в смесь, учитывали следующее: на однородность распределения фибр в объеме бетона основное влияние оказывают размеры фибры и крупного заполнителя, тип смесителя и способ подачи волокон; увеличение отношения l_f/d_f обеспечивает повышение анкерующей способности фибр в бетоне; увеличение отношения l_f/d_f снижает возможность их качественного перемешивания с бетонной смесью; приготовление сталефибробетонных смесей с фибрами l_f/d_f 50 не вызывает особых затруднений, т.к. они могут засыпаться в работающий или подвижный смеситель сразу, порцией на весь замес и последовательность введения компонентов смеси (цемента, заполнителей, воды, фибр) в этом случае не имеет существенного значения; загрузка фибр с $l_f/d_f = 50-100$ в работающий смеситель сразу, порцией на весь замес, приводит к тому, что комки фибр при перемешивании пропитываются цементным раствором, образуя тем самым устойчивые «ежи» различных размеров; фибры с $l_f/d_f > 100$ характеризуются высокой степенью связанности и вызывают самые большие проблемы при приготовлении и укладке сталефибробетонной смеси в конструкции. Таким образом, вопрос выбора волокон должен находить свое решение не только с позиции работы волокна в бетоне, но и с технологической точки зрения. Как показывает практика приготовления и укладки сталефибробетона, следует использовать волокна с более низкими отношениями l_f/d_f зачастую в ущерб прочности бетона. Большое влияние на технологический процесс приготовления сталефибробетонной смеси оказывает количество и максимальный размер зерен крупного заполнителя. С увеличением содержания крупного заполнителя объемное содержание фибры, которое может быть введено без комкования,

линейно уменьшается. Кроме того, излишне большие зерна крупного заполнителя могут нарушать равномерность распределения фибр по объему, оттесняя и концентрируя их в полостях между крупным заполнителем. При этом нарушается однородность и плотность дисперсно-армированного бетона.

Подобного отрицательного явления можно избежать, назначая крупность щебня не более расчетного расстояния между волокнами. В данной работе использовали смесь гранодиоритового высокопрочного щебня и дробленого гравия фракции 5-20 мм. В заводской лаборатории ЖБИ «Казметрострой» для определения предела прочности на сжатие в возрасте 3, 14 и 28 суток были сформованы девять образцов кубов размером 0,1х0,1х0,1 м, а для определения предела прочности при изгибе в возрасте 28 суток стандартные образцы-балочки размером 0,1х0,1х0,4 м в количестве 3 шт. Составы фибробетона представлены в таблице 1.

Таблица 1 Исследованные составы бетона										
Наименование материалов	Ед.	измерения	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси для составов, %							
Портландцемент	%		1	2	3	4	5			
Щебень гранодиоритовый	%		15,33	15,1	14,98	14,86	14,75			
Щебень из дробленого гравия	%		30,45	30,19	29,96	29,72	29,49			
Песок обогащенный	%		14,03	13,91	13,80	13,69	13,58			
Песок речной	%		14,42	14,30	14,19	14,08	13,97			
Фибра стальная	%		0	0,26	0,51	0,77	1,02			
Суперпластификатор, СП-1 (15% раствор)	%		1,4*	1,4*	1,4*	1,4*	1,4*			
Вода	%		Остальное							
Средняя плотность бетонной смеси	кг/м ³		2497	2517	2537	2557	2577			

*Примечание – расход добавки в % от расхода цемента

Подвижность бетонной смеси принята равной 7-8 см, которая применяется при изготовлении железобетонных блоков обделки перегонных тоннелей на заводе ЖБИ «Казметрострой». Раздельное приготовление бетонной смеси осуществляли в лабораторной мешалке принудительного действия. Дозирование компонентов смеси производили в три этапа в следующей последовательности: на первом этапе раздельно дозировали и вводили в мешалку (щебень+ песок+ цемент) и перемешивали в сухом виде в течение 30 с; на втором этапе равномерно в течение 30 с подавали в смеситель стальную фибру в процессе перемешивания и осуществляли дополнительное перемешивание в течение минуты; на третьем этапе добавляли в смеситель воду вместе с заданным количеством 15 %-го водного раствора добавки С-3 и осуществляли окончательное перемешивание еще в течение 2-3,5 минут. Раздельное приготовление бетонной смеси осуществляли в лабораторной мешалке принудительного действия. Дозирование компонентов смеси производили в три этапа в следующей последовательности: на первом этапе раздельно дозировали и вводили в мешалку (щебень+ песок+ цемент) и перемешивали в сухом виде в течение 30 с; на втором этапе равномерно в течение 30 с подавали в смеситель стальную фибру в процессе перемешивания и осуществляли дополнительное перемешивание в течение минуты; на третьем этапе добавляли в смеситель воду вместе с заданным количеством 15 %-го водного раствора добавки С-3 и осуществляли

окончательное перемешивание еще в течение 2-3,5 минут. Таким образом, общее время перемешивания составляло 3,5-5 минут. Затем определяли подвижность бетонной смеси и формовали контрольные образцы размером 0,1 x 0,1 x 0,1 м на стандартной лабораторной виброплощадке. Прочность бетона испытывали согласно требованиям ГОСТ 10180-90 (СТ СЭВ 3978-83). Условия твердения образцов после изготовления принимали по ГОСТ 18105.

Определение предела прочности образцов на сжатие производили в возрасте 3, 14 и 28 суток, а предела прочности при изгибе в возрасте 28 суток. Результаты и обсуждение. Результаты испытаний представлены на рис. 1-3 в виде зависимостей прочности на сжатие и изгиб сталефибробетона в разном возрасте от значения коэффициента объемного армирования. Данные, представленные на рис. 1, показывают, что наибольшее значение прочности сталефибробетона обеспечивается при уровне объемного армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$. При незначительном армировании ($\mu_{fv} = 0,25\%$) прочность на сжатие практически не меняется по сравнению с бетоном без армирования. Увеличение степени армирования от 0,5 до 0,75% способствует некоторому спаду прочности бетона, но при этом она выше бетона без арматуры. Дальнейшее насыщение бетона-матрицы стальной фиброй (свыше 0,75%) способствует снижению прочности СФБ ниже уровня неармированного бетона. Это, видимо, связано с «разрыхлением» структуры сталефибробетона по причине переизбытка фибры, которая, не равномерно распределится по объему бетона между зернами крупного заполнителя, и формирует зоны избыточного внутреннего напряжения при нагружении бетона. Возможно, это также связано с тем, что излишне большие зерна крупного заполнителя могут нарушать равномерность распределения фибр по объему, «подталкивая» их к формированию «ежей». Анализ характера кривых, представленных на рис. 2, показывает логарифмическое повышение прочности образцов бетона с увеличением их возраста. При этом если бетон без дисперсного армирования в возрасте 3 суток имеет прочность при сжатии 45 МПа, то с увеличением количества вводимой стальной фибры до 0,5 и 0,75%, прочность увеличивается соответственно до 51 и 54 МПа. В возрасте 28 суток наибольшую прочность имеет бетон с 0,5% фибры (74 МПа), а с 0,75% фибры – 69 МПа. Увеличение дозировки фибры до 1,0% способствует формированию сталефибробетона с меньшей прочностью, чем бетон без армирования. Следовательно, можно принять, что оптимальной дозировкой стальной фибры, обеспечивающей наибольшую прочность бетона на сжатие, является 0,5% по объему. Рис. 1 Поверхность зависимости изменения предела прочности при сжатии образцов от возраста сталефибробетона и содержания фибры. Рис. 2 Зависимости изменения предела прочности при сжатии образцов сталефибробетона в возрасте 3, 14 и 28 суток от объемного содержания фибры. Наибольший интерес представляет влияние фибрового армирования на прочность бетона при изгибе. Поэтому были одновременно с

образцами кубами сформованы образцы-балочки размером 0,1х0,1х0,4 м в количестве 3 шт. каждого состава. Результаты испытания представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что увеличение коэффициента объемного армирования до 0,75% способствует почти линейному увеличению прочности на изгиб с 4,38 МПа (состав без фибры) до 6,48 МПа. Дальнейшее увеличение дозировки стальной фибры (до $\mu_{fv} = 1,0\%$) способствует некоторому снижению прочности на изгиб до 5,7 МПа по сравнению с прочностью СФБ при $\mu_{fv} = 0,75\%$, но прочность бетона остается выше, чем для контрольного состава без дисперсного армирования.

Рис. 3 Зависимость изменения предела прочности при изгибе образцов

сталефибробетона при увеличении коэффициента объемного армирования

Выводы Одноуровневое дисперсное армирование бетона-матрицы класса В45 резанной стальной фиброй производства НПО «Магнитогорск Фибра-Строй» обеспечивает увеличение прочностных показателей СФБ в возрасте 3, 14 и 28 суток при коэффициенте объемного армирования от 0,25 до 0,75%.

Максимальное увеличение предела прочности при сжатии бетона (на 13,8%) по сравнению с контрольным составом (без армирования) обеспечивается при коэффициенте объемного армирования $\mu_{fv} = 0,5\%$. При коэффициенте армирования $\mu_{fv} = 0,75\%$ прочность образцов при изгибе в возрасте 28 суток повышается на 47,9% по сравнению с контрольным составом без армирования.