

УДК 624.21.095.4(047)

П. В. КОВТУН, кандидат технических наук, К. С. РАЗВОДОВ, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПОДБОР СОСТАВА БЕТОННОЙ СМЕСИ И ВЫБОР ПРОПИТКИ ДЛЯ СВЕТОПРОВОДЯЩЕГО БЕТОНА

Проанализированы виды оптического волокна и способы распределения в них светового потока. Подобраны составы светопроводящего мелкозернистого бетона, проведены опытные замесы и получены образцы светопроводящего бетона. Проанализированы результаты прочности на сжатие и растяжение при изгибе образцов с применением и без применения оптического волокна с целью определения снижения или повышения данных характеристик.

Введение. Светопроводящий бетон впервые был создан венгерским архитектором Ароном Лосконши в 2002 году. Задумавшись над тем, как добавить в помещения из бетона солнечного света, при этом не нарушив прочности конструкции, он пришел к идее модификации внутреннего строения бетона. Добавив в состав бетонной смеси светопроводящее оптическое волокно, Лосконши получил внешне привлекательные блоки, полностью соответствующие эксплуатационным характеристикам искусственного камня. Новый строительный материал он назвал *литтраконом*, оттолкнувшись от словосочетания *light transmitting concrete*, дословно переводящегося как *светопроводящий бетон*.

Светопроводящий бетон впервые использовался по своему прямому назначению при строительстве в 2005 году особняка в стиле hi-tech, спроектированного коллегой Лосконши из Германии Юргеном Ломаном. Именно этот пример и продемонстрировал все качества, присущие новейшему строительному материалу. Другим сооружением, при строительстве которого был использован этот вид бетона, стало центральное здание автомобильного завода BMW г. Лейпциге, созданное известным архитектором Захой Хадид, ставшей впоследствии обладателем Немецкой архитектурной премии.

Высокая стоимость материала пока не позволяет довольно широко применять его в строительстве зданий в промышленных масштабах, однако с увеличением производства оптического волокна (самого дорогого компонента светопроводящего бетона) и поиском новых технологий, снижающих стоимость его производства, закономерно ожидается падение цен на данный вид сырья.

Одной из сфер применения данного материала может стать дорожное (железнодорожное) и мостовое строительство, а также благоустройство приобъектных территорий (тротуары, лестницы) в части повышения их интерактивности в темное время суток.

Основная часть. Для определения вида используемого оптического волокна было применено оптическое волокно торцевого и бокового свечения. Разность распределения светового потока обусловлена разными химическими составами оптического волокна. Так, оптическое волокно торцевого свечения проводит световой поток без потерь на расстояние до нескольких десятков метров, в то время как оптическое волокно бокового свечения теряет значительную часть светового потока уже на расстоянии в несколько метров от источника света (рисунок 1).

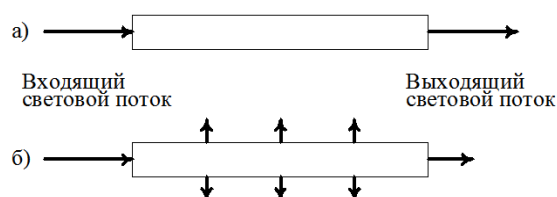


Рисунок 1 – Схема распределения светового потока в оптическом волокне:
а – торцевого свечения; б – бокового свечения

Однако в условиях бетонных изделий для дорожного и мостового строительства, где максимальная толщина слоя светопроводящего бетона составит 15 см (для камня бортового БР 100.30.15, выпускаемого по СТБ 1097–2012), и отсутствии потерь светового потока в теле бетона у волокна бокового свечения для производства допустимо использовать оба вида оптического волокна.

Поскольку состав оптического волокна неизвестен, то необходимо провести анализ химического взаимодействия с компонентами планируемой бетонной смеси: добавкой-пластификатором Хидетал ГП-9а (альфа) на основе поликарбоксилатов и пропиткой для поверхности бетонов Сифтор Б. При температуре производственной среды 20 °С время воздействия химической добавки на оптическое волокно (до завершения процесса схватывания бетонной смеси) не превысит 12 часов. При обработке концентратом пропитки время полного высыхания составляет 4 часа. В связи с этим оптическое волокно каждого вида было помещено в раствор добавки-пластификатора и концентрата пропитки для бетонов на 12 часов. В результате выявлено полное отсутствие химического взаимодействия оптического волокна с данными химическими веществами. На боковой и торцевой поверхности отсутствуют разрушения целостности поверхностного слоя, цвет не изменен. Таким образом, данные химические вещества можно использовать для производства светопроводящего бетона.

Для изготовления экспериментальных образцов в соответствии с СТБ 1182–99 было подобрано три состава бетонной смеси и произведены на их основе опытные лабораторные замесы для получения наилучших свойств при наименьшей стоимости.

Для бетонной смеси были использованы следующие инертные материалы (таблица 1):

- песок крупнозернистый (карьер Боруны);
- песок мелкозернистый (карьер УПТК Гомельского горисполкома);
- щебень фракции 5–10 мм (РУПП «Гранит»).

Для получения марок бетона по прочности на сжатие 300–400 наиболее рационально использовать бездобавочный портландцемент марки ПЦ500 Д0.

Таблица 1 – Расход материалов на 1 м³ бетонной смеси

В килограммах

Материал	Номер пробного состава		
	1	2	3
Цемент	595	730	405
Песок (Боруны)	1425	–	–
Песок (УПТК)	–	1290	765
Щебень фр. 5–10 мм	–	–	1045
Вода	180	200	150
Химическая добавка	3,85	4,75	2,45
Оптическое волокно	8,6	8,6	8,6

Для изготовления светопроводящего бетона щебень фракции крупнее 10 мм не применяется в связи с небольшой прослойкой бетона между слоями оптического волокна. Оптическое волокно будет располагаться послойно на расстоянии 1,5–2 см. Также неприменимость щебня крупнее 10 мм связана с тем, что при вибрации в процессе изготовления изделий он будет оседать (стремиться ко дну формы), попутно продавливая и изменяя положение и рядность оптического волокна, тем самым нарушая его ориентированность, что повлияет на распределение света по рабочей грани изделия и прочностные свойства.

Для исследования прочности на сжатие светопроводящего бетона с послойным расположением оптического волокна в теле бетона используются образцы-кубы размером 100×100×100 мм, изготовленные по каждому из трех составов. В связи с тем, что применение оптического волокна является аналогом армирования, а разрушающая нагрузка ожидаемо должна быть выше, то принимаются схемы армирования образцов, приведенные на рисунке 2.

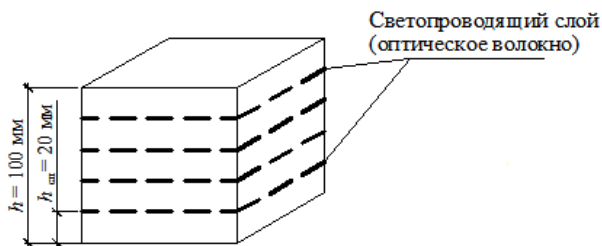


Рисунок 2 – Схема армирования образцов-кубов 100×100×100 мм

Далее производятся лабораторные замесы по разработанным составам. Объем лабораторного замеса принимается равным объему изготавливаемых образцов с коэффициентом 1,2 в соответствии с ГОСТ 10180–2012. Количество образцов в серии принимается равным 6. По каждому составу изготавливается серия образцов, армированных оптическим волокном, и серия образцов без оптического волокна. Объем бетонной смеси, необходимый для получения серии образцов

$$V_c = 1,2abln, \quad (1)$$

где 1,2 – коэффициент, увеличивающий объем пробы бетонной смеси для изготовления контрольных образцов; a , b – размеры поперечного сечения образца, м; l – длина образца, м; n – количество образцов в серии, шт.

Таким образом, объем бетонной смеси для лабораторного замеса по одному составу

$$V_{\text{сост}} = 2V_c, \quad (2)$$

где 2 – количество серий образцов для данного состава.

Для образцов кубов 100×100×100 мм количество бетонной смеси на изготовление одной серии образцов

$$V_c = 1,2 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,1 \cdot 6 = 0,0072 \text{ м}^3,$$

а объем лабораторного замеса по одному составу

$$V_c = 2 \cdot 0,0072 = 0,0144 \text{ м}^3.$$

Для исключения налипания бетонной смеси на поверхность формы используется смазка для форм или машинное масло, нанесенное на поверхность тонким слоем. В подготовленную смазанную форму укладывается и распределяется бетонная смесь толщиной 20 мм. Смесь тщательно штыкуется 10 раз, после чего на поверхность уплотненной бетонной смеси раскладывается оптическое волокно с интервалом 4–5 мм. При этом волокна слегка утапливаются в выступившем цементном молоке во избежание их смещения при укладке следующих 20 мм бетонной смеси. Схема раскладки оптического волокна приведена на рисунке 3.

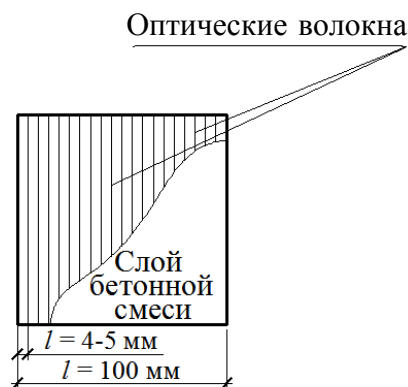


Рисунок 3 – Схема раскладки оптического волокна в светопроводящем слое (вид сверху) образцов-кубов 100×100×100 мм

Далее форма снова заполняется бетонной смесью на толщину 20 мм. Смесь опять тщательно штыкуется 10 раз, но только на толщину чуть менее толщины слоя уложенной бетонной смеси, поскольку при проникновении штыковки в светопроводящий и ранее уложенный слой ориентированность волокон может быть нарушена. Далее процесс повторяется. После четвертого светопроводящего слоя форма заполняется полностью, штыкуется на толщину слоя до выступления цементного молока и выравнивания поверхности, после чего образец маркируется.

Изготовленные образцы помещаются в нормальные условия с температурой воздуха в помещении $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $W_{\text{отн}} = 95 \%$. Образцы расплачиваются через двое суток. Испытания по показателям прочности на сжатие проводятся на 7-е сутки.

Также в ходе проведения лабораторных замесов необходимо отметить низкую технологичность состава № 2. В связи с отсутствием зерен крупнее 2,5 мм бетонная смесь практически не уплотняется, оптические во-

локна не удерживаются на поверхности ранее уложенного и уплотненного слоя бетонной смеси и смещаются при заполнении формы следующим слоем бетонной смеси.

Испытания бетона проводятся по способу приложения нагрузки в двух направлениях волокон: нормально уложенным слоям и параллельно уложенным слоям для оценки влияния на прочность направленности волокон (рисунок 4).

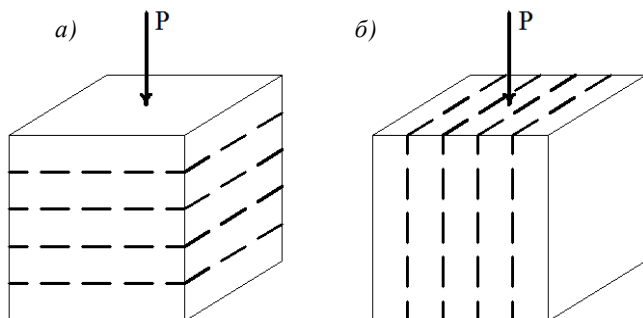


Рисунок 4 – Способы приложения нагрузки при испытании прочности бетона:

a – нагрузки нормально уложенным слоям;
б – параллельно уложенным слоям

Результаты испытания бетона по показателям прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытания бетона по показателям прочности на сжатие (*B*) на 7-е сутки, МПа

Показатель	Номер пробного состава					
	1		2		3	
	С оптическим волокном	Без оптического волокна	С оптическим волокном	Без оптического волокна	С оптическим волокном	Без оптического волокна
<i>B</i> (при приложении нагрузки нормально уложенным слоям)	43,5	40,4	34,8	32,4	31,5	29,6
<i>B</i> (при приложении нагрузки параллельно уложенным слоям)	23,4	37,1	21,4	26,8	20,9	25,1

По результатам испытаний прочности бетона на сжатие, представленным в таблице 2, можно сделать вывод, что расположение волокон параллельно прикладываемой нагрузке недопустимо в связи со снижением прочности на 30–40 %. Поэтому для конструкций из светопроводящего бетона необходимо предусматривать направление волокон под углом как можно более близким к 90° по отношению к направлению прикладываемой нагрузки, что повышает прочность на сжатие на 7,1 %.

График темпа набора прочности бетона представлен на рисунке 5.

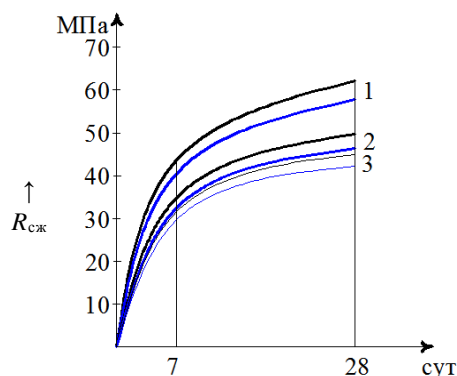


Рисунок 5 – График темпа набора прочности бетона на сжатие (образцы, изготовленные с применением оптического волокна; образцы, изготовленные без применения оптического волокна); 1, 2, 3 – номера состава

В дальнейшем был проведен анализ стоимости бетона по каждому составу. Стоимость сырья приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Стоимость сырья и расчет стоимости 1 м³ бетонной смеси

Материал	Цена за 1 т (1 м.п.)	Номер пробного состава					
		1		2		3	
		Кол-во, т (м.п.)	Цена на состав	Кол-во, т (м.п.)	Цена на состав	Кол-во, т (м.п.)	Цена на состав
Цемент	114,7	0,595	68,25	0,73	83,73	0,405	46,1
Песок (Боруны)	9,29	1,425	13,24	–	–	–	–
Песок (УПТК)	4	–	–	1,290	5,16	0,765	3,06
Щебень фр. 5–10 мм	14,93	–	–	–	–	1,045	15,6
Вода	0,8	0,180	0,14	0,2	0,16	0,15	0,12
Химическая добавка	1750	0,00385	6,73	0,00475	8,31	0,00245	4,28
Оптическое волокно	0,43	799,6	343,83	799,6	343,83	799,6	343,83
Итоговая стоимость (за 1 м³ бетонной смеси)			432,19		441,19		412,99

На основании анализа стоимости и технологичности смеси, а также наибольших значений прочности для дальнейшей работы будет принят состав № 1.

Для работы светопроводящего бетона в условиях воздействия раствора соли в воде и соляного тумана необходимо предусмотреть пропитку для поверхности бетона с целью предотвращения разрушения при работе в условиях агрессивной среды (класс XF4), особенно на границе оптическое волокно – бетон. Сегодня в Беларуси успешно зарекомендовала себя пропитка Сифтор Б. Она активно применяется в обработке железобетонных парапетных ограждений на автомобильных дорогах республики.

Перспективность светопроводящего бетона в дорожном строительстве связана с повышением в последние годы интереса к устройству цементобетонных покрытий автомобильных дорог. Материал делает возможным дублирование в темное время суток элементов дорожной разметки на опасных участках дорог с жестким покрытием без разрыва среды материала, что облегчит уход за ним в зимнее время.

При создании инновационных пешеходных переходов (оборудованных интерактивными полосами, дублирующими сигнал светофора для пешеходов) применение светопроводящего бетона позволит повысить антивандальность инженерного обустройства. В отличие от полимерных материалов, литракон не изменяет своих свойств под действием высоких температур, не подвержен мгновенному нарушению целостности и потере свойств поверхности при механических воздействиях.

Для повышения архитектурной привлекательности и снижения травмоопасности светопроводящий бетон можно применять на кромках ступеней лестничных маршей. На въездах на мосты и путепроводы, а также на нижних уровнях развязок элементы вертикальной разметки из светопроводящего бетона составят конкуренцию элементам вертикальной разметки из металла, которые для предотвращения воздействия агрессивной среды необходимо подвергать горячему цинкованию или окрашиванию эмалями. При нарушении защитного покрытия элементы вертикальной разметки из металла

и их крепления корродируют, передавая коррозию вглубь бетонных балок, колонн, на которых они закреплены.

Выводы.

1 Оптическое волокно не взаимодействует с химическими веществами, входящими в состав бетонной смеси.

2 Оптическое волокно при расположении под углом, близким к 90° к направлению действия нагрузки, повышает прочность изделий, выполняя в них роль армирующего элемента.

3 Предложенный состав № 1 соответствует по показателям прочности на сжатие (B) и прочности на растяжение при изгибе (B_{tb}) требованиям к изделиям, используемым в дорожном строительстве, для которых можно применить светопроводящий бетон.

Список литературы

1 ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Минск : Госстандарт, 2015. – 36 с.

2 СТБ 1182–99. Бетоны. Правила подбора состава. – Минск : Госстандарт, 2000. – 16 с.

3 СТБ 2221–2011. Бетоны конструкционные тяжелые для транспортного и гидротехнического строительства. Технические условия. – Минск : Госстандарт, 2012. – 30 с.

4 СТБ 1097–2012. Камни бетонные и железобетонные. Технические условия. – Минск : Госстандарт, 2008. – 18 с.

5 СТБ 1545–2005. Смеси бетонные. Методы испытаний. – Минск : Минстройархитектуры, 2005. – 24 с.

Получено 30.09.2019

P. U. Koutun, K. S. Razvodov. Selection of a concrete mixture and selection of the optimal impregnation for light-conductive concrete.

The types of optical fiber and methods of distribution of the light flux in them are analyzed. Compositions of light-conducting fine-grained concrete were selected, experimental batchings were carried out and samples of light-conducting concrete were obtained. The results of the compressive and tensile strength in bending of the samples with and without the use of optical fiber are analyzed in order to determine the decrease or increase in these characteristics.