

УДК 691.3

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СВЕТОПРОВОДЯЩЕГО БЕТОНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЕГО В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Канд. техн. наук П. В. Ковтун, магистрант К. С. Разводов

LIGHTING CONCRETE PRODUCTION FEATURES AND PROSPECTS OF APPLICATION IN RAILWAY CONSTRUCTION

PhD (Tech.) P.V. Kovtun, master K. S. Razvodov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.195.2021.241073>

Аннотация. Светопроводящий бетон, впервые предложенный в 2002 году, дает возможность увеличить безопасность безбарьерной среды на железных дорогах и не только. Использование такого бетона позволяет видеть пешеходную разметку в темное время суток и обезопасить движение пешеходов на опасных участках.

Светопроводящий бетон не изменяет свои свойства под действием природных факторов, что позволит значительно сократить расходы на содержание инженерных сооружений вокзалов, пешеходных переходов и т. д.

Одной из сфер применения светопроводящего бетона может стать транспортное строительство и благоустройство приобъектных территорий (тротуары, лестницы, платформы) в части повышения их интерактивности в темное время суток.

Ключевые слова: светопроводящий бетон, эксперимент, оптические волокна, прочность, дорожное строительство.

Abstract. The prospect of light-conducting concrete in railway construction is associated with an increase in recent years in interest in creating a barrier-free environment, including at railway stations, platforms, pedestrian crossings, in pedestrian tunnels, and so on. The material makes it possible to duplicate marking elements in hazardous areas of passenger movement at night without breaking the material environment, which will facilitate care for it in the winter.

When creating innovative pedestrian crossings (equipped with interactive lanes that duplicate the traffic light for pedestrians), the use of light-conducting concrete will increase the antivandistance of the engineering arrangement. Unlike polymeric materials, the litacon material considered in the article does not change its properties under the influence of high temperatures, is not susceptible to instantaneous violation of the integrity and loss of surface properties under mechanical stresses.

The high cost of the material does not yet allow its widespread use in the construction of railway infrastructure facilities on an industrial scale, however, with an increase in the production of optical fiber (the most expensive component of light-conducting concrete) and the search for new technologies that reduce the cost of its production, a drop in prices for this type of raw material is naturally expected.

One of the areas of application of light-conducting concrete can be transport construction and landscaping of on-site territories (sidewalks, stairs, platforms) in terms of increasing their interactivity in the dark.

The article proposes a composition (No. 1) corresponding to the compressive strength and tensile strength when bending, the requirements for products used in railway construction, for which light-conductive concrete can be used.

The problem of light-transmitting concrete in the maintenance of railway infrastructure in the Republic of Belarus is being raised for the first time.

Keywords: *lightconducting concrete, experiment, optical fibers, strength, road construction.*

Введение. Светопроводящий бетон впервые был создан венгерским архитектором Ароном Лосконши в 2002 году. Задумавшись над тем, как добавить в помещения из бетона солнечного света, не нарушая при этом 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 литраконом, взяв за основу словосочетание light transmitting concrete, которое дословно переводится как светопроводящий бетон.

Светопроводящий бетон впервые использовался по своему прямому назначению при строительстве в 2005 году особняка в стиле hi-tech, спроектированном его коллегой 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 главное здание Лейпцигского автомобильного концерна BMW, созданное известным архитектором Захой Халид, ставшей впоследствии обладательницей Немецкой архитектурной премии.

Высокая стоимость материала пока не позволяет довольно широко применять его в строительстве объектов железнодорожной инфраструктуры 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 железнодорожное и мостовое строительство, а также благоустройство приобъектных территорий (тротуары, лестницы) в части повышения их интерактивности в темное время суток.

Применение светопроводящего бетона позволит сделать объекты железной дороги более заметными, что в свою очередь повысит безопасность как пешеходов, так и подвижного состава.

Анализ последних исследований и публикаций. Светопроводящий бетон – современный материал, появившийся в 2002 году. Сейчас основной проблемой применения материала является его высокая стоимость, что отражено в работах таких ученых, как М. Х. Кодзоев, С. Л. Исаченко, И. М. Арцукевич, М. Zielińska, A. Ciesielski, K. Shreyas. В этих трудах описана технология, компоненты, необходимые для получения светопроводящего бетона, а также отражены результаты испытаний материала.

М. Х. Кодзоев, С. Л. Исаченко [1] в своей работе «Светопроводящий бетон» показывают технологию производства и применения светопроводящего бетона, его прочностные характеристики.

Использование светопроводящего бетона позволяет обеспечить экономию энергии и затрат на теплоизоляцию. Но главным его недостатком является высокая стоимость.

Белорусский ученый И. М. Арцукевич [2] в своих работах описывает способ получения светопроводящего материала, используя различные составы вяжущих веществ и оптические волокна.

М. Zielińska, A. Ciesielski [3] изучают прочностные характеристики светопроводящего бетона и его особенности.

К. Shreyas [4] описывает прозрачный бетон как новый тип бетона, представленный в современную эпоху, который обладает особыми свойствами

пропускания света благодаря наличию стеклянных стержней или оптических волокон. Он легче обычного бетона с такими особенностями, как низкая плотность и теплопроводность. Основной целью его исследования является разработка светопрозрачных бетонных блоков с использованием стеклянных стержней и оптических волокон с песком и цементом, а затем анализ их различных физико-технических свойств по сравнению с обычными бетонными блоками.

Применение в сфере рельсового транспорта может повысить безопасность пешеходов и пассажиров путем выполнения границ посадочных платформ изделиями из светопроводящего бетона, а также дублирование ими сигнала светофора, запрещающего пешеходам движение через железнодорожные пути.

В данной статье впервые говорится о возможности использования светопроводящего бетона в железнодорожном строительстве: при возведении посадочных платформ, организации переходов через железнодорожные пути. Кроме того, приведена стоимость 1 м^3 бетонной смеси для изготовления плитки тротуарной в соответствии с СТБ 1071-2007.

Определение цели и задачи исследования. Основной целью данной статьи является рассмотрение возможности применения светопроводящего бетона в транспортном строительстве и благоустройстве приобъектных территорий железнодорожных станций, вокзалов и т. д.

Главная задача исследования – анализ экспериментальных образцов, изготовленных из светопроводящего бетона, и по результатам испытаний – выбор наиболее подходящего состава при наименьшей стоимости изготовления.

Основная часть исследования. 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 (рис. 1).

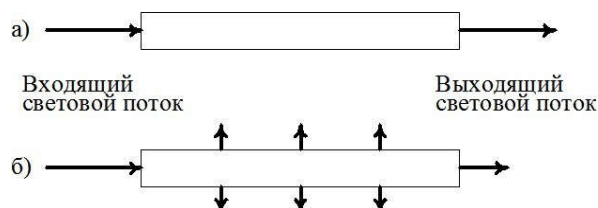


Рис. 1. Схема распределения светового потока в оптическом волокне:
а – торцевого свечения; б – бокового свечения

Однако в условиях бетонных изделий для дорожного и мостового строительства [5], где максимальная толщина слоя светопроводящего бетона составит 15 см (для камня бортового БР 100.30.15, выпускаемого по СТБ 1097-2012 [6]), и при отсутствии потерь светового потока в теле бетона у волокна бокового свечения для производства допустимо использовать оба вида оптического материала [7].

Поскольку состав оптического волокна неизвестен, то необходимо провести анализ химического взаимодействия с компонентами планируемой бетонной смеси: добавкой-пластификатором Хидетал ГП-9а (альфа) на основе поликарбосилатов и пропиткой для поверхности бетонов Сифтор Б. При температуре производственной среды $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 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 [8].

Для изготовления экспериментальных образцов в соответствии с СТБ 1182-99 [9] 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 (табл. 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

Материал	Расход материалов по составу, кг		
	Номер пробного состава		
	1	2	3
Цемент	595	730	405
Песок (Боруны)	1425	-	-
Песок (УПТК)	-	1290	765
Щебень фракции 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 к 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 100x100x100 мм, изготовленные по каждому из трех составов [10]. 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 рис. 2.

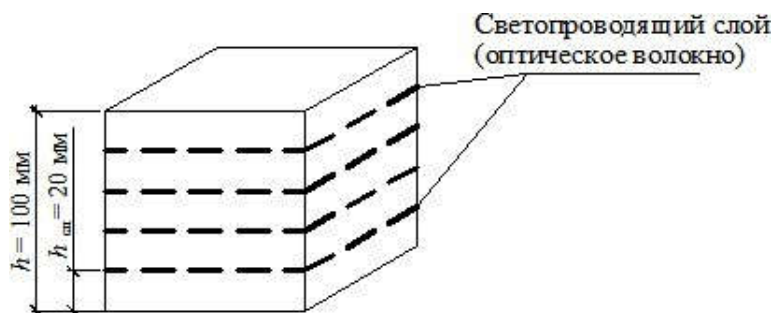


Рис. 2. Схема армирования образцов-кубов 100x100x100 мм

В целях исключения налипания бетонной смеси на поверхности 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. Волокна слегка утапливаются в выступившем цементном молоке во избежание их смещения при укладке следующих 20 мм бетонной смеси. Схема раскладки оптического волокна приведена на рис. 3.

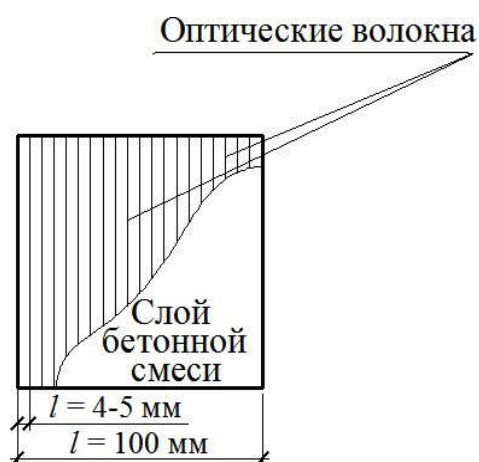


Рис. 3. Схема раскладки оптического волокна в светопрводящем слое (вид сверху) образцов-кубов 100x100x100 мм

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 светопрводящий и ранее уложенный слой ориентированность волокон может быть нарушена. Далее процесс повторяется. После четвертого светопрводящего 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 распалубливаются через двое суток. Испытания по показателям прочности на сжатие проводятся на седьмые 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 волокна не удерживаются на поверхности ранее уложенного и уплотненного слоя бетонной смеси и смещаются при заполнении формы следующим слоем бетонной смеси.

Для оценки влияния на прочность направленности волокон испытания бетона проводятся по способу приложения

нагрузки в двух направлениях: нормально уложенным слоям волокон и параллельно уложенным слоям волокон (рис. 4).

Результаты испытания бетона по показателям прочности на сжатие представлены в табл. 2.

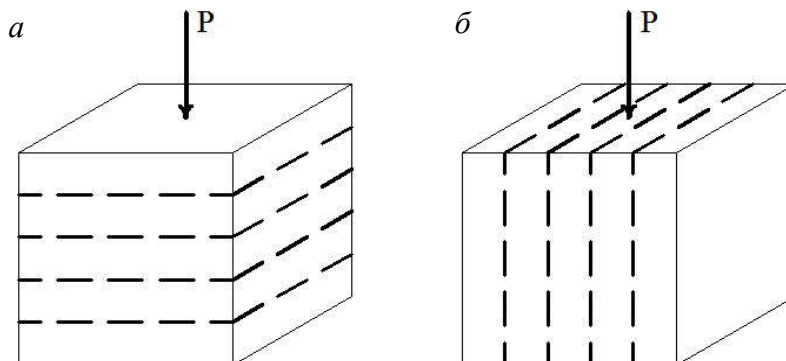


Рис. 4. Способы приложения нагрузки при испытании прочности бетона:
a – приложение нагрузки нормально уложенным слоям;
б – приложение нагрузки параллельно уложенным слоям

Таблица 2

Результаты испытания бетона по показателям прочности на сжатие (*B*), МПа

Показатель	Номер пробного состава					
	1		2		3	
	С оптическим волоконном	Без оптического волокна	С оптическим волоконном	Без оптического волокна	С оптическим волоконном	Без оптического волокна
на 7-е сутки						
<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
на 28-е сутки						
<i>B</i> (при приложении нагрузки нормально уложенным слоям)	61,9	56,2	49,4	46,2	45,0	42,6
<i>B</i> (при приложении нагрузки параллельно уложенным слоям)	33,4	52,1	31,4	38,8	29,9	36,1

Результаты испытаний показали, что недопустимо расположение волокон параллельно прикладываемой нагрузке. Поэтому для конструкций из светопроводящего бетона необходимо предусматривать направление волокон под углом, как можно более близким к 90° по отношению к направлению приклады-

ваемой нагрузки, что повышает прочность на сжатие на 7,1 %.

График темпа набора прочности бетона представлен на рис. 5.

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

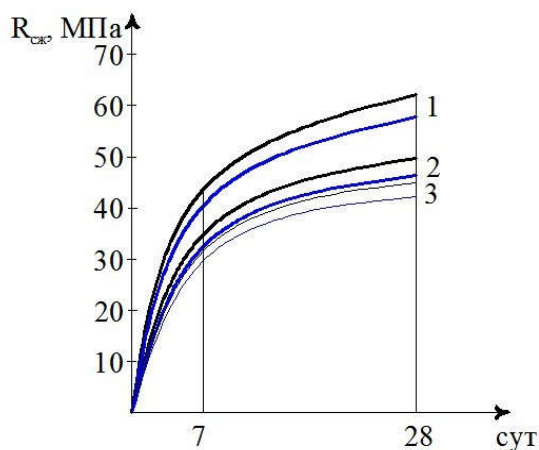


Рис. 5. График темпа набора прочности бетона на сжатие (образцы, изготовленные с применением оптического волокна (черный цвет); образцы, изготовленные без применения оптического волокна (синий цвет)): 1, 2, 3 – номер состава

Таблица 3

Стоимость сырья и расчет стоимости 1 м³ бетонной смеси (бел. руб.)

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 фракции 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 принимается 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 железнодорожном строительстве связана с повышением в последние годы интереса к устройству безбарьерной среды, в том числе на железнодорожных вокзалах, перронах, пешеходных переходах, в пешеходных тоннелях и т. д. Материал делает возможным дублирование в темное время суток элементов разметки на опасных участках передвижения пассажиров 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 устройства. 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 [11].

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 (В) требованиям к изделиям, используемым в железнодорожном строительстве, для которых можно применить светопроводящий бетон [12].

Список использованных источников

1. Кодзоев М. Х., Исаченко В. Л. Светопроводящий бетон. *Бюллетень науки и практики*. 2018. Т. 4. № 6. С. 184–187.
2. Арцукевич И. М. Получение светопроводящего бетона. *Наука и образование сегодня*. 2017. С. 19–20.
3. Monika Zielińska, Albert Ciesielski. Analysis of Transparent Concrete as an Innovative Material Used in Civil Engineering. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. № 245. P. 1–7.
4. Shreyas Krishnappa. Litracon. *International Journal of New Technologies in Science and Engineering*. 2018. Vol. 5. Issue. 6. P. 41–56.
5. СТБ 2221-2011. Бетоны конструкционные тяжелые для транспортного и гидротехнического строительства. Технические условия. Минск: Госстандарт, 2012. 30 с.
6. СТБ 1097-2012. Камни бетонные и железобетонные. Технические условия. Минск: Госстандарт, 2008. 18 с.

7. Губанов Д. О., Комарова Н. Д. К вопросу модифицирования цементов и бетонов. *Университетская наука: сб. статей. Минеральные Воды*, 2016.
8. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Кардумян Г. С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Типография «Парадиз», 2010. 25 с.
9. СТБ 1182-99. Бетоны. Правила подбора состава. Минск: Госстандарт, 2000. 16 с.
10. СТБ 1545-2005. Смеси бетонные. Методы испытаний. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 24 с.
11. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Минск: Госстандарт, 2015. 36 с.
12. Разводов К. С., Ковтун П. В., Этин П. Ю. Инновационные материалы в дорожной отрасли. *Теория и практика исследований, проектирования и САПР в строительстве: сборник статей IV Междунар. науч.-техн. конф.* 2020. С. 153–161.

Ковтун Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта. Тел.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by. ORCID iD: 0000-0002-1507-3531.

Разводов Константин Сергеевич, магистрант кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта. Тел.: +375447350305. E-mail: kostia.raz@mail.ru. ORCID iD: 0000-0003-1279-8649.

Kovtun Pavel Vladimirovich, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department «Design, construction and operation of transport facilities» of the Belarusian State University of Transport. Tel.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by. ORCID iD: 0000-0002-1507-3531.

Razvodov Konstantin Sergeevich, master, Department «Design, Construction and Operation of Transport Facilities» of Belarusian State University of Transport. Tel+375447350305. E-mail: kostia.raz@mail.ru. ORCID iD: 0000-0003-1279-8649.

Статтю прийнято 25.01.2021 р.