

Кротов Родион Геннадьевич, аспирант, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Чистова Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

Rodion Krotov, post graduate student, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

Tatyana Chistova, PhD in Engineering Science, associate professor, Belarusian National Technical Univesity, Minsk (Belarus)

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН В КОНСТРУКЦИЯХ ШВОВ НА АВТОДОРОЖНЫХ МОСТАХ

HIGH STRENGTH CONCRETE IN THE CONSTRUCTIONS ON THE ROAD TRANSPORT BRIDGES

АННОТАЦИЯ

Деформационные швы автодорожных мостов являются важными элементами мостового полотна, и от их надежности и долговечности во многом зависит срок службы всего мостового сооружения. На дорогах с высокой интенсивностью транспортного движения в Республике Беларусь наиболее широко применяются деформационные швы с резинометаллическими компенсаторами, которые крепятся к бетонному армированному основанию с помощью заделанных в него шпильек. Вследствие действия больших транспортных динамических нагрузок на деформационный шов шпильки воспринимают значительные напряжения, что приводит к разрушению бетонного основания, что подтверждено расчетом методом конечных элементов. В связи с этим потребовалось разработать высокопрочный бетон, способный упруго воспринимать динамические нагружения.

Структура высокопрочного бетона неоднородна, на границе раздела заполнитель-цемент имеются полости контактов, которые являются концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности бетона.

Противостоять этим явлениям можно путем усиления связей между структурными элементами бетона. Для этих целей используют различные способы дисперсного армирования в зоне контакта, активации и модифицирования контактирующих поверхностей минеральных материалов, клинкерных составляющих и новообразований.

В статье рассмотрено влияние мелкодисперсных наполнителей и фибры на прочность бетона. Испытания бетона проводились в соответствии с

нормативными требованиями на бетон. Приведены результаты экспериментальных исследований комплексного упрочнения бетона и технологии устройства оснований для деформационного шва. Совместное использование активированного заполнителя, активной мелкозернистой добавки и фибры позволяет получить высокопрочный бетон, способный упруго воспринимать динамическую транспортную нагрузку.

Высокопрочный бетон характеризуется набором интенсивной прочности, в первые три суток прочность достигает 80 МПа, что позволяет в короткие сроки распалубить бетон и открыть автомобильное движение по дороге.

ABSTRACT

Control joints (DS) of highway bridges are important elements of the bridge deck, and their reliability and durability depends largely on the life of the entire bridge structure.

Control joints with rubber-metal compensators which are attached to the concrete reinforced foundation with the use of pegs which are already fixed to this foundation are used on the roads with the high intensity of transport in the Republic of Belarus. Since high transport dynamic capacity affect the control joints, the pegs perceive considerable tension which cause destruction of the concrete foundation, which is confirmed by finite element analysis. According to this fact, high strength concrete was essential to be developed in order to perceive dynamic functioning capacity resiliently.

The structure of high-strength concrete is heterogeneous, at the interface between- cement filler has cavity contacts that are stress concentrators and contribute to the reduction of the strength of the concrete. Contact aggregate-cement is reinforced by the use of different methods of particulate reinforcement in the zone of contact activation and modification of the contacting surfaces of mineral materials, components and clinker tumors.

These effects are eliminated by strengthening the links between the concrete structural elements.

The influence of fine-dyspersated extenders and the impact of fibres on the stability of the concrete are considered in the article. The tests were carried out grounded on concrete regulations. The results of the experimental complex strengthening of the concrete and the technologies of the arrangement of foundations for the control joints are also viewed in the article. The combined usage of activated aggregate, an active fine supplement and a fiber allows to obtain high-strength concrete, able to resist the elastic dynamic traffic load.

High-strength concrete is gaining strength in the first three days, the strength reaches 80 МПа, this enables to dismantle the concrete and the traffic on the road will be restored in a short time.

Ключевые слова: деформационный шов, динамические нагрузки, мелкодисперсный наполнитель, фибра

Keywords: control joint, dynamic loads , thin filler , fiber

ВВЕДЕНИЕ

Деформационные швы (ДШ) автодорожных мостов являются важными элементами мостового полотна, и от их надежности и долговечности во многом зависит срок службы всего мостового сооружения. Состояние ДШ оказывает большое влияние также на комфортность и безопасность дорожного движения [1].

На конструкции ДШ воздействуют: природно-климатические факторы; транспортные нагрузки, непосредственно контактирующие с элементами ДШ; эксплуатационные факторы, главным образом при очистке от снега и льда; деформации при перемещении концов пролётных строений мостов.

КОНСТРУКЦИЯ ДШ

Согласно [2], конструкция современного ДШ должна обеспечивать его высокую прочность, надежность и долговечность. Расчетный срок службы в реальных условиях эксплуатации должен быть не менее 20 лет [3].

В настоящее время на участках дорог с высокой интенсивностью движения автомобильного транспорта в Республике Беларусь наиболее широко применяются ДШ с резинометаллическим компенсатором (рис. 1) [4].

Крепление данных деформационных швов к мостовым и дорожным конструкциям осуществляется при помощи болтового соединения следующим образом. В бетонное армированное основание заделываются шпильки, которые привариваются к арматуре. При помощи гаек резинометаллические элементы притягиваются к бетонному основанию.

Вследствие действия больших динамических нагрузок на ДШ от транспорта шпильки воспринимают значительные напряжения (рис. 2).

При этом в бетоне накапливаются пластические деформации, и в месте контакта шпильки с бетоном наблюдаются его разрушения. Для предотвращения этого явления необходимо, чтобы напряжения не превосходили величины, равной 20% от расчетной прочности бетона [5], что определяет упругую стадию работы бетона.

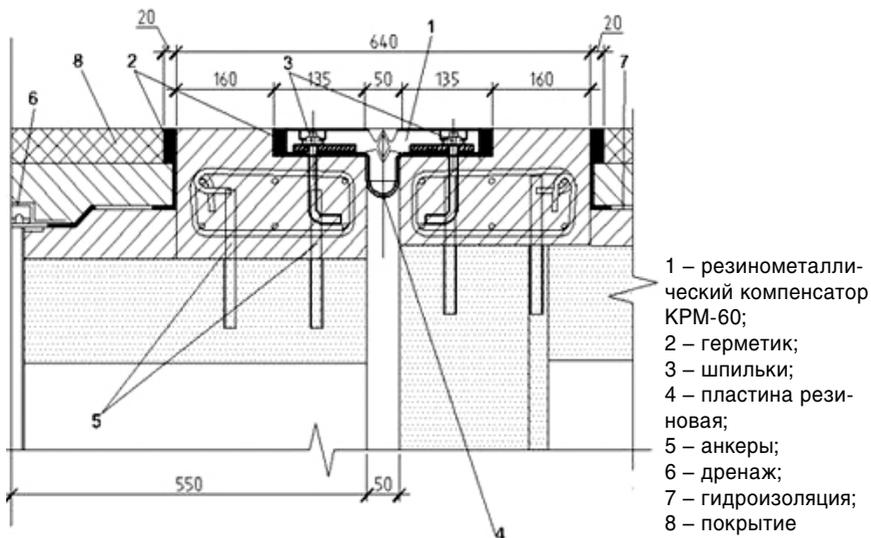


Рисунок 1. Деформационный шов КРМ-60

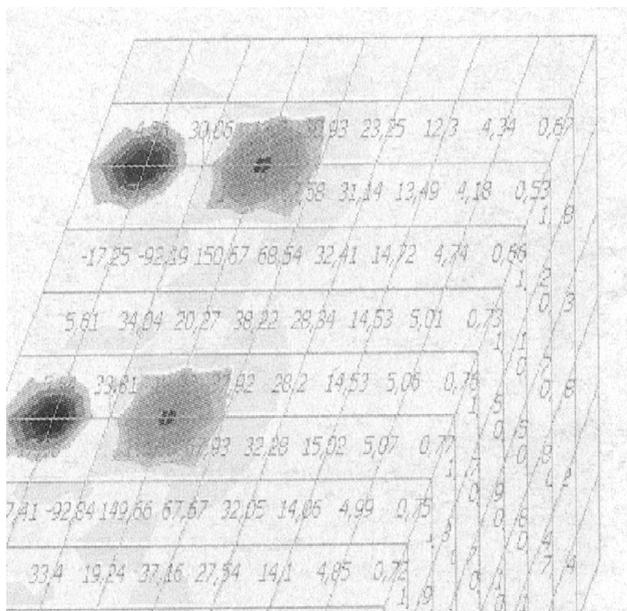


Рисунок 2. Напряжение в зоне шпилек от динамических нагрузок

Из представленных на рисунке 2 данных видно, что напряжение в бетоне в зоне шпилек составляет в среднем 21 МПа (синий цвет). Бетон, который может работать в упругой стадии, должен иметь прочность более 100 МПа. Поэтому необходимо использовать высокопрочный бетон (ВБ), который позволит без разрушений воспринимать изгиб шпилек в зоне их заделки ДШ.

В Республике Беларусь к высокопрочным бетонам (ВП) относятся бетоны класса по прочности В45 и выше [6]. Чтобы получить такой бетон, нужно непосредственно на месте бетонирования обеспечить нормальное протекание сложных коллоидно-химических и физических процессов [7], на которые влияют многочисленные технологические и погодно-климатические факторы, качество используемых материалов и т.д.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВБ

К материалам для ВБ предъявляются определенные требования. Известно, что механические свойства крупного заполнителя, его форма и размер зерен, а также химическое взаимодействие между заполнителем и цементной матрицей оказывают существенное влияние на прочность ВБ [8]. Верхняя и нижняя граница размеров зерен заполнителя должны быть определены с тем, чтобы была достигнута наибольшая плотность наполнения объема бетона и тем самым снижены внутренние напряжения, вызванные неоднородностью структуры. Для ВБ рекомендуется использовать базальтовый, габбровый или гранитный щебень [9].

В качестве мелкого заполнителя в ВБ используются природные крупные и среднезернистые пески. Доля песка в смеси заполнителей должна составлять от 0,32 до 0,25 и понижаться с увеличением расхода цемента и увеличением требуемой прочности бетона [10].

В качестве вяжущего в ВБ используется цемент с активностью не менее 50 МПа и нормальной густотой более 25%. Важнейшими характеристиками используемых в ВБ цементов являются минералогический состав клинкера, размер и соотношение зерен цемента.

Прочность цементного камня напрямую зависит от водоцементного отношения (В/Ц). Для стабильности показателей прочности бетона величина В/Ц должна быть постоянной и не превышать 0,4, за счет чего уменьшается пористость и повышается прочность матрицы цементного камня [9].

В последнее время для получения ВБ применяют вяжущее низкой водопотребности (ВНВ), которое является высокомарочным вяжущим. Его марки лежат в пределах М 700-1000 [5].

СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ БЕТОНА

Даже при оптимальном подборе исходных материалов структура бетона может иметь дефекты. Если рассмотреть физическую модель бетона, предложенную Е.А. Гузеевым, К.А. Пирадовым, С.Н. Леоновичем [11], то она имеет вид системы разномасштабных зерен (клинкера, песка, щебня) со связями взаимопротяжения в виде активных сил, созданных физическими, химическими и адгезионными процессами в результате гидратации цемента.

Эта структура ВБ неоднородна, на границе раздела «заполнитель-цемент» имеются полости контактов [12], которые являются концентраторами напряжений и способствуют снижению прочности бетона (рис. 3).

Зерно щебня

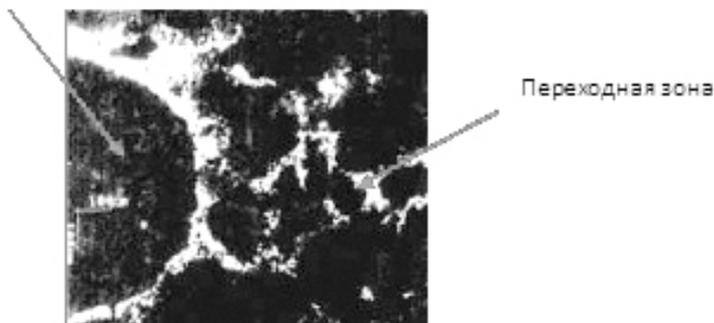


Рисунок 3. Структура бетонной смеси

Противостоять этим негативным явлениям можно путем усиления связей между структурными элементами бетона. Для этих целей используют различные способы дисперсного армирования в зоне контакта, активации и модифицирования контактирующих поверхностей минеральных материалов, клинкерных составляющих и новообразований.

В публикации [13] предложена обработка крупного заполнителя неорганическим активатором в виде солей поливалентных металлов (Me^{+n}). Исследование электрокинетических характеристик гранитного щебня показало, что обработка его поверхности водными растворами солей указанных металлов приводит к изменению ξ - потенциала минеральной поверхности и к перезарядке поверхности с отрицательного знака на положительный знак. Это существенно меняет ее физико-химические параметры при взаимодействии с цементным камнем и

обеспечивает прирост прочности бетона, причем в более раннем возрасте [13]. Созданию прочной кристаллогидратной тоберморитовой структуры цементного камня способствует образование соединений состава $2\text{CaSiO}_2 \cdot m\text{Me} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. При использовании активированного щебня наблюдается рост прочности бетона на 30-35%.

Для устранения микродефектов в структуре цементного камня в него вводят мелкодисперсные наполнители. В качестве наполнителей для ВБ применяются микрокремнезем в виде порошка или водной суспензии, золы-уноса, метакаолин [10]. В некоторых случаях применяется кварцевая или известковая мука. Благодаря своим микроразмерам зерна наполнителя, вступившего во взаимодействие с цементом, уплотняют структуру бетона.

Хороший результат дает совместное использование в качестве наполнителя микрокремнезема и золы-уноса. Вследствие различия в размерах частичек этих наполнителей достигается более плотная структура матрицы, что особенно благотворно влияет на стойкость бетона к агрессивному воздействию окружающей среды. Установлено, что количество микрокремнезема не должно превышать 10% от массы цемента, причем даже 2% от массы цемента достаточно, чтобы значительно увеличить прочность и улучшить свойства бетона [8].

Следует отметить, что с повышением прочности бетона растет и его хрупкость, снижаются пластично-деформационные свойства, что влечет за собой практически мгновенное разрушение материала при достижении им предельного состояния. При динамическом воздействии транспорта на элементы ДШ могут возникнуть напряжения, вызывающие также разрушения бетонного основания. Предотвратить эти явления можно с помощью введения в ВБ дисперсной арматуры (фибра) [14].

Актуальным направлением получения высококачественных цементных бетонов, отличающихся более широким спектром функциональных возможностей, является использование комплексных многокомпонентных добавок, сочетающих в себе индивидуальные добавки различного функционального назначения. Так, в исследованиях, содержащихся в диссертационной работе [15], в качестве компонентов комплексных модификаторов высокопрочного дисперсно-армированного бетона предлагаются тонкодисперсные добавки-наполнители с высокими пуццоланическими свойствами на основе молотых техногенных отходов камнедробления природных материалов в сочетании с супер- и гиперсуперпластификаторами и армирующими волокнами. Дисперсное армирование позволяет модифицировать бетон на двух уровнях:

микроуровне — уровне цементной матрицы и макроуровне — уровне цементного бетона. Двухуровневое дисперсное армирование бетона рассматривается как эффективное средство повышения прочности при сжатии и растяжении, трещиностойкости и ударной вязкости.

Исходя из изложенного, перспективным способом получения ВБ, обладающего требуемой прочностью для восприятия динамических нагрузок, является введение в состав смеси активированных заполнителей, активных мелкодисперсных наполнителей и армирующей фибры, что позволит упруго воспринимать усилия, передаваемые от ДШ на шпильки крепления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании теоретических предпосылок было предложено новое техническое решение [16], включающее крепление деформационного шва к балкам пролетного строения посредством шпилек, погруженных в основание из фибробетона, заполняющего полости сопрягающихся участков.

Данное техническое решение апробировано на Минской кольцевой автодороге (рис. 4). В полость был установлен каркас из арматуры, к которому приваривались шпильки, а затем она заполнялась бетонной смесью следующего состава; кг/м³:

Портландцемент М 550	—	550;
Вода	—	135,2;
Активированный		
щебень фр.	10-16	— 800,0;
	6,3-10	— 350,0;
	4-6,3	— 150,0;
	2-4	— 50,0;
Песок природный	—	500,0;
Микрокремнезем	—	10% от массы цемента;
Фибра (полипропиленовая, длиной 12 мм)	—	2% от массы цемента;
Пластифицирующие добавки	—	1,3% от массы цемента.

Смесь имела следующие показатели:

Отношение В/Ц	0,246;
Осадка конуса	16-20 см.

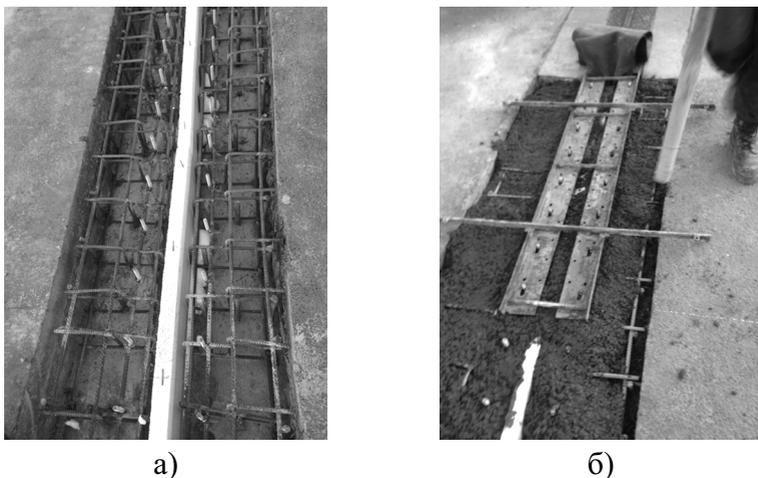


Рисунок 4. Конструкция ДШ с резинометаллическим компенсатором.
Заливка ВБ.

Результаты механических испытаний ВБ на сжатие показали, что в нем наблюдается активный прирост прочности, что подтверждает теоретические предпосылки об эффективности введения активных мелкодисперсных наполнителей, активированного щебня и армирующей фибры (рис. 5).

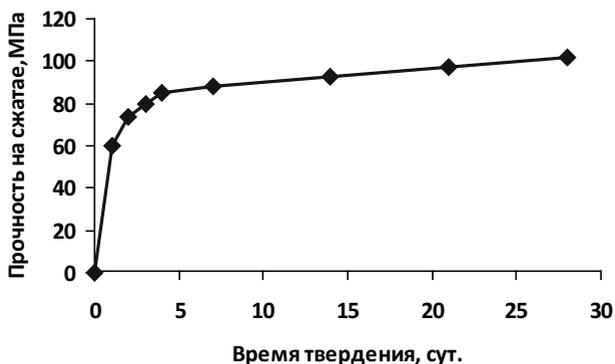


Рисунок 5. Изменение прочности бетона от вида добавок

В результате достигнут требуемый уровень прочности ВБ, который составил 102 МПа в 28-суточном возрасте.

Экспериментальный ДШ хорошо себя зарекомендовал после семи лет эксплуатации (рис. 6) под тяжелой транспортной нагрузкой (интенсивность движения до 100 тысяч автомобилей в сутки).

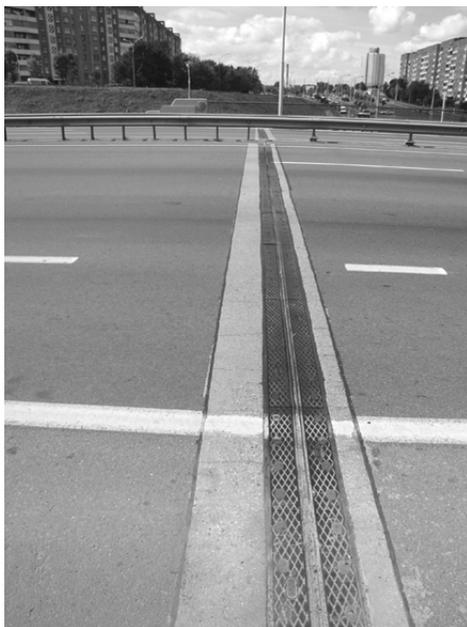


Рисунок 6. Минская кольцевая автодорога, км 8 (ДШ устроен в 2008 г.)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследования подтвердили теоретические предположения, что совместное использование активированного заполнителя, активной мелкозернистой добавки и фибры позволяет получить ВБ, способный упруго воспринимать динамическую транспортную нагрузку.
2. ВБ данного состава характеризуется набором интенсивной прочности, в первые трое суток прочность достигает 80 МПа, что позволяет в короткие сроки распалубить бетон и открыть автомобильное движение по дороге.
3. Эксплуатация таких швов не требует больших затрат на их обслуживание и ремонт, поскольку обеспечивается совместная работа всех элементов ДШ и его крепления к мостовым конструкциям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ефанов, А. В. Статический и динамический расчет деформационных швов автодорожных мостов / А. В. Ефанов, И. Г. Овчинников // Вестник ВОЛГГАСУ. Сер. Стр-во и архит. – 2006. – Вып. 6. – С. 34 – 37.
2. Ефанов, А. В. Деформационные швы автодорожных мостов. Особенности конструкции и работы. Учебное пособие / А.В. Ефанов, И. Г. Овчинников, В. И. Макаров, В. И. Шестериков. – Саратов, 2005. – 124 с.
3. Köster, W. The functioning and operation of the modern modular expansion joint system / W. Köster, S. Brown // Rep. on Third World Congress on Joints and Bearings, Toronto, Canada, Oct. – Nov., 1991. – Электронный ресурс: <http://www.techstar-ino.com/artman/uploads/t1030402.pdf>. – 15 p.
4. Зверинский, В. А. Конструкция деформационного шва с резинометаллическим компенсатором КРМ-120, обеспечивающим перемещения до 120 мм / В. А. Зверинский, Р. Г. Кротов, Т.А. Рубцова // Автомобильные дороги и мосты. – 2013. – № 1. – С. 90 – 95.
5. Микульский, В. Г. Строительные материалы. Материаловедение. Учеб. издание / В. Г. Микульский. – М.: Издательство Ассоциация строительных вузов, 2004. – 536 с.
6. Бетоны. Классификация. Общие технические требования: СТБ 1310-2002. – Введ. 01.07.02. – Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2002. – 13 с.
7. Урханова, Л. А Применение золы террикоников в качестве активной минеральной добавки в легком высокопрочном бетоне / А. С. Ефременко, Л. А. Урханова // Строительные материалы. – 2012. – № 1. – С. 31 – 33.
8. Шевченко, В. А. Технология применения специальных бетонов. Учебное пособие / В. А. Шевченко. – Сибирский федеральный университет, 2012. – 155 с.
9. Мещерин, В. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения / В. Мещерин // СтройПРОФИЛЬ. – 2008. – № 8-08. – С. 32 – 35.
10. Зайцев, И. Н. Высокопрочный бетон / И.Н. Зайцев // СтройПРОФИЛЬ. – № 8-07. – 2007.
11. Гузеев, Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики / Е. А. Гузеев. – Брест: БрПИ, 1999. – 218 с.
12. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов / С. Н. Леонович. – Минск: БИТУ, 1999. – 46 с.

13. Бусел, А. В. Активация крупного заполнителя – резерв экономии цемента и повышения прочности тяжелого бетона / А. В. Бусел, В. В. Киселев, Т. А. Чистова // Технологии бетонов. – 2009. – № 7-8. – С. 28 – 30.
14. Голубев, В. Ю. Высокопрочный бетон повышенной вязкости. Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / В. Ю. Голубев. – Санкт-Петербург, 2009. – 18 с.
15. Симакина, Г. Н. Высокопрочный дисперсно-армированный бетон. Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Г. Н. Симакина. – Пенза, 2006. – 21 с.
16. Деформационный шов пролетного строения моста. Пат. ВУ 10378 Е 02 В 3/16 / Р. Г. Кротов, Т. А. Рубцова; заяв. Республиканское дочернее унитарное предприятие «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт «БелдорНИИ». – № 20130787; заявл. 07.10.2013; опубл. 30.10.2014.

REFERENCES

1. Efanov A.V., Ovchinnikov I. G. *Bulletin of VSUAC*. 2006, Vol. 6(21). pp. 34-37. (rus)
2. Efanov A.V., Ovchinnikov I. G., Makarov V.I., Shesterikov V.I. *Deformacionnye shvy avtodorozhnykh mostov. Osobennosti konstruktivnykh i raboty* [Control joint of the motor roads. Special qualities of its contradicting and application]. Saratov, 2005. 124 p. (rus)
3. Köter W., Brown S. *The functioning and operation of the modern modular expansion joint system* // Rep. on Third World Congress on Joints and Bearings, Toronto, Canada, Oct. – Nov., 1991. Electronic resource: <http://www.techstar-ino.com/artman/uploads/t1030402.pdf>. 15 p. (en)
4. Zverinskij V. A., Krotov R.G., Rubtsova T.A. *Motor roads and bridges*. 2013. № 1. pp. 90 – 95. (rus)
5. Mikilskij V. G. *Stroitelnye materialy. Materialovedenie* [Building materials. Science of materials]. Moscow: Publishing house “Association of the building institutions”, 2004. 536 p. (rus)
6. *Betony. Klassifikaciya. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya* [Concretes. Classifications. General technical requirements]. STB 1310-2002. Minsk, 2002. 13 p. (rus)
7. Efremenko A. S., Urhanova L. A. *Building materials*. 2012. № 1. pp. 31-33.
8. Shevchenko V. A. *Tekhnologiya primeneniya specialnykh betonov* [Technology of the usage of special concretes]. Siberian federal university. 2012. 155 p. (rus)
9. Mecherin V. *StroyProfile*. 2008. № 8-08. pp. 32-35. (rus)

10. Zaycev I. N. *StroyProfile*. 2007. № 8-07. (rus)
11. Guzeev E. A. *Mekhanika razrusheniya betona: voprosy teorii i praktiki* [Mechanics of the concrete destruction: questions of the theory and practice]. Brest: BrPI, 1999. 218 p. (rus)
12. Leonovich S. N. *Treshchinostojkost i dolgovechnost betonnykh i zhelezobetonnykh elementov* [Coach resistance and durability concrete and steel-concrete elements]. Minsk: BITU, 1999. 46 p. (rus)
13. Busel A. V. Kiselev T. A., Chistova V. V. *Technologies of concrete*. 2009. № 7-8. pp. 28-30. (rus)
14. Golubev V. U. *Vysokoprochny beton povyshennoj vyazkosti* [High-strength concrete of the increased viscosity]. Autoabstract of the dissertation for the degree in the technical science: 05.23.05 Saint Petersburg, 2009. 18 p. (rus)
15. Simakina G. N. *Vysokoprochny dispersno-armirovanny beton* [High-strength dispersing-armature concrete] Autoabstract of the dissertation for the degree in the technical science: 05.23.05. Penza, 2007. 21 p. (rus)
16. *Deformatsionny shov proleznogo stroeniya mosta* [Control joint ups the transit construction of the bridge]. Patent BY 10378 E 02 B 3/16 / R.G. Krotov, T.A. Rubtsova, Republican Unitarian Subsidiary – Belorussian road scientific-research institute “BeldorNII”. № 20130787; application 07.10.2013; publishing. 30.10.2014. (rus)

Статья поступила в редколлегию 11.11.2015