

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 625.848:624.078

**КРОТОВ**  
**Родион Геннадьевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ НА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ МОСТОВ  
В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Минск, 2019

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

**БУСЕЛ Алексей Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник государственного предприятия «БелдорНИИ», г. Минск

Официальные оппоненты:

**ВЕРЕНЬКО Владимир Адольфович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование дорог» Белорусского национального технического университета, г. Минск;

**ГУСЕВ Дмитрий Евгеньевич,**  
кандидат технических наук, главный специалист ООО «Экомост», г. Минск

Оппонирующая организация

Учрежденит образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Защита состоится 2 июля 2019 г. в 11.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (+37517) 293-96-73. E-mail: kovshar-36@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук



Ковшар С.Н.

© Кротов Р.Г., 2019  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь эксплуатируется более 6,5 тыс. автодорожных мостов и путепроводов. Реальный срок их службы составляет 30–40 лет вместо расчетных 60–100 лет. Одним из проблемных элементов являются деформационные швы (далее – швы), от их надежности и долговечности во многом зависит продолжительность работы мостовых сооружений. Состояние швов оказывает большое влияние также на безопасность и комфорт движения при проезде по мостовому полотну.

Деформационные швы работают в сложных условиях, поскольку на них действуют: транспортные нагрузки, непосредственно воспринимаемые элементами шва; перемещения концов пролетных строений, линейные и угловые; погодноклиматические факторы. Отдельно следует выделить воздействие противогололедных реагентов, используемых при зимнем содержании дорог, которое приводит к коррозии элементов конструкции шва, нарушению герметичности и последующему разрушению несущих элементов мостового сооружения.

Вопросами обеспечения долговечности мостов занимались многие известные ученые: Е.Е. Гибшман, И.Г. Овчинников, В.И. Шестериков, Г.П. Пастушков, А. Hartkorn, J. Beaugend, A. Motonosuke и др. Они обратили внимание на ключевую роль деформационных швов в повышении срока службы этих искусственных сооружений. Об актуальности проблемы долговечности мостовых сооружений свидетельствуют программные решения по развитию мостостроения в Республике Беларусь. В частности, в Государственной программе по развитию и содержанию автомобильных дорог в Республике Беларусь на 2015–2019 годы предусмотрено расширение области применения монолитного бетона в мостостроении, что позволит повысить срок службы мостовых сооружений до капитального ремонта до 60 лет. Установленный срок эксплуатации мостов требует применения принципиально новых технических решений для всех его элементов, в том числе и для швов, эксплуатирующихся в сложных условиях под интенсивной транспортной нагрузкой.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами.** Работа связана с выполнением:

1. Государственной научно-технической программы «Ресурсосбережение, новые материалы и повышение технического уровня, технологии – 2015» (подпрограмма «Новые материалы», утвержденная приказом Государственного комитета по науке и технологиям от 25.10.2013 № 348, задание 2.35: «Разработать эластичные армированные композиционные материалы и технологию их применения с повышенной устойчивостью к деформациям в швах на мостах и путепроводах» (№ ГР 20141175)).

2. Плана НИР и ОКР Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь на 2011 г. (тема 08.526.2.2011 «Исследование и разработка конструкций де-

формационных швов с резинометаллическим компенсатором для устройства непрерывной проезжей части длиной более 120 м» (№ ГР 20110488)).

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – создать долговечные деформационные швы, конструкция которых, система крепления и превентивные мероприятия по поддержанию их работоспособности обеспечивают надежное восприятие деформаций пролетных строений мостов и интенсивного динамического воздействия тяжеловесного транспорта в течение расчетного периода эксплуатации мостового сооружения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ существующих конструктивных и технологических решений по устройству и содержанию деформационных швов, позволяющих выявить условия обеспечения требуемой их долговечности, сопоставимой со сроком службы всего мостового сооружения;

- разработать расчетную модель работы деформационного шва под тяжелой транспортной нагрузкой в условиях температурных деформаций пролетных строений моста, отличающуюся тем, что в ней должны быть учтены особенности демпфирования части нагрузки при торможении тяжелых транспортных средств и упругого ее восприятия в зоне крепления к бетонному основанию;

- сконструировать резинометаллический элемент шва, обеспечивающий его устойчивую работу при действии динамических транспортных нагрузок и расчетных деформаций пролетных строений моста;

- разработать систему крепления резинометаллических элементов к окаймляющему переходному участку из монолитного бетона и технологию бетонирования в построечных условиях, обеспечивающих сокращение периода прерывания движения по мостовому сооружению;

- провести опытно-экспериментальные работы по апробации новой конструкции деформационного шва и его крепления к монолитному бетону окаймляющего переходного участка;

- изучить эксплуатационные параметры работы швов и провести диагностику их работоспособности в условиях реальной интенсивной транспортной нагрузки;

- разработать технологию устройства и содержания швов для обеспечения требуемого 60-летнего срока службы мостовых конструкций до капитального ремонта;

- внедрить и провести технико-экономический анализ работы деформационного шва с учетом эксплуатационных затрат.

**Научная новизна** заключается:

- в разработанной расчетной модели работы шва, позволяющей определить условия снижения динамической нагрузки от тяжеловесного транспорта и исключения существенных пластических деформаций в бетоне в зоне крепления, что обеспечивает длительную работоспособность шва;

- в конструктивных решениях шва, позволяющих воспринимать большие деформации, вызванные перемещением пролетных строений моста, и динамическую нагрузку от тяжелого транспорта;

- в способе получения высокопрочного бетона в построечных условиях, позволяющем сократить срок перерыва в движении транспорта при устройстве и ремонте деформационных швов;

- в технологии содержания шва, предусматривающей поддержание его демпфирующей способности при динамическом воздействии транспортной нагрузки, что обеспечивает диссипацию части энергии, способной вызывать разрушения в зоне крепления шва;

- в разработанной системе диагностики состояния шва по уровню звуковой эмиссии при перемещении резинометаллических элементов в результате их контакта с колесами автотранспортных средств.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты расчета усилий в элементах деформационного шва и в зоне его крепления, позволяющие сконструировать резинометаллический компенсатор с прокладками, поглощающими часть нагрузки при торможении тяжелых транспортных средств и подобрать состав высокопрочного бетона для упругого восприятия многократной нагрузки;

- способ получения высокопрочного бетона путем термостатирования при температуре  $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$  смеси, включающей активированный заполнитель, микрокремнезем, дисперсную арматуру, гиперпластификатор, позволяющий обеспечить быстрый набор прочности, достаточный для открытия движения транспорта в течение трех суток после завершения бетонирования зоны крепления деформационного шва;

- система эксплуатационных мероприятий для обеспечения работоспособности шва, основанная на периодическом обжатии до 0,9 МПа резиновых прокладок для предупреждения их проскальзывания по поверхности бетона, обеспечении поглощения части энергии торможения транспорта до 30 Дж за один проход; на замене прокладок при достижении предела энергии разрушения резины, равного  $27 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>;

- метод диагностики устойчивой работы деформационного шва под транспортной нагрузкой, основанный на замере уровней эквивалентного и максимального шума в устроенных швах и определение их разности, что позволяет выявить появление дополнительной звуковой эмиссии в случае выхода шва из нормального режима его эксплуатации;

- результаты практической апробации разработанных деформационных швов под реальной транспортной нагрузкой на различных мостовых сооружениях, подтверждающие устойчивую их работу при количестве 17–22 млн. проходов расчетных автомобилей АК-100.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Автору принадлежит выбор направления и постановка задач исследований, выбор расчетной модели и создание приемлемой конструкции шва, разработка технологии устройства и содержания шва, оценка работоспособности шва на основе акустической диагностики. Автором самостоятельно проведены экспериментальные и внедренческие работы по получению высокопрочного бетона в условиях стройплощадки при устройстве элементов крепления шва, налаживанию промышленного изготовления резинометаллических компенсаторов с требуемыми деформационными свойствами. Определение целей и задач исследований, обобщение результатов проводились при консультации с научным руководителем – доктором технических наук, профессором А.В. Буселом.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Инновации в технике и технологии дорожно-строительного комплекса» (г. Минск, БНТУ, 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Международные автомобильные дороги, качество, безопасность, инновации, образование» (г. Алматы, 2015 г.), 6-й Европейской транспортной конференции «Движение вперед. Инновационные решения для транспорта будущего» (г. Варшава, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Инновации в дорожном строительстве» (г. Минск, Белавтодор, 2016 г.), Международной юбилейной научно-технической конференции «Автомобильные дороги: безопасность и надежность», посвященной 90-летию Белорусской дорожной науки (г. Минск, 2018 г.)

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований на объектах транспортной инфраструктуры Беларуси в течение 2004–2018 гг. устроено более 2 тыс. погонных метров швов с предложенными автором техническими решениями. На этих объектах проводились работы по освоению технологии изготовления элементов шва и приемов бетонирования зоны крепления в построенных условиях, методов содержания содержания швов на основе мониторинга их работоспособности. В это же время было налажено серийное производство и применение резинометаллических компенсаторов для швов в Республике Беларусь и Российской Федерации.

**Опубликованность результатов диссертации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 11 научных статей, том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК РБ, 8 материалов и тезисов докладов на научно-технических конференциях. Получен патент Республики Беларусь.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 171 страницу, 126 страниц машинописного текста, 55 рисунков, 33 таблицы, 14 приложений. Библиографический список включает 220 наименований, из которых 12 авторские работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** проанализирована значимость деформационных швов для устойчивой работы мостовых сооружений и отмечено влияние различных факторов на работоспособность их конструктивных элементов. В работах ряда ученых швы выделены в качестве важнейших элементов, обеспечивающих долговечность мостовых сооружений. Указано, что в программных документах развития мостостроения в Республике Беларусь приоритетом является обеспечение длительной работоспособности мостовых конструкций.

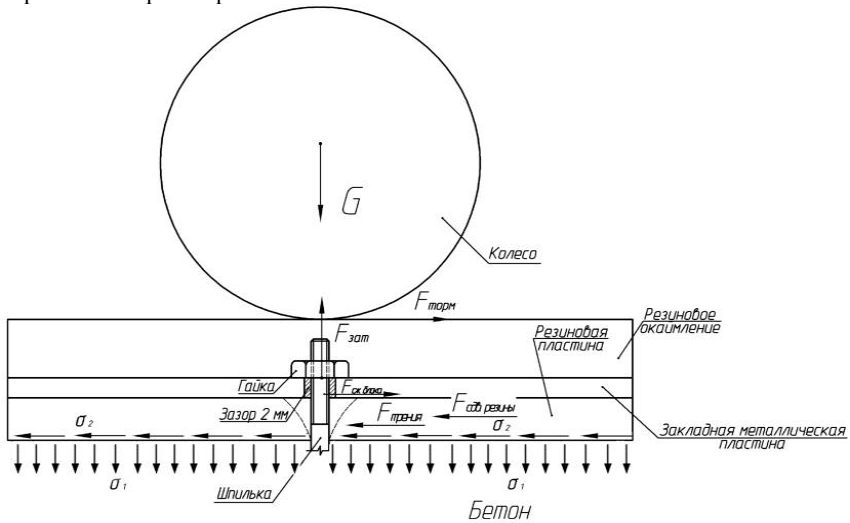
**Первая глава** содержит обзор методов повышения устойчивости деформационного шва к действию транспортной нагрузки и погодноклиматических факторов.

Из проведенного анализа литературных данных следует, что нерешенными остаются вопросы:

- надежного крепления шва к слою монолитного бетона, соединяющего его с пролетным строением;
- демпфирования части динамической транспортной нагрузки в элементах шва при проезде тяжеловесного транспорта;
- предотвращения коррозии монолитного бетона в зоне крепления шва;
- поддержания работоспособности шва на протяжении расчетного срока эксплуатации мостового сооружения за счет проведения профилактических мероприятий.

Проведенный анализ литературы по рассматриваемой проблеме позволил определить цель и сформулировать задачи исследования.

Во **второй** главе разработана физическая расчетная модель (рисунок 1) работы шва в самых неблагоприятных условиях нагружения при максимальных перемещениях пролетных строений мостов и воздействии тяжелой транспортной нагрузки. На основании нее выполнен расчет усилий, возникающих в элементах шва при торможении транспорта.



$G$  – осевая нагрузка, приходящаяся на одно колесо;  $F_{\text{торм}}$  – усилие от торможения автомобильного колеса;  $F_{\text{зат}}$  – усилие предварительной затяжки гайки;  $F_{\text{сдв}}$  – сопротивление сдвигу резины;  $F_{\text{ск. блока}}$  – усилие, возникающее в резинометаллическом блоке при его растяжении или сжатии;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения на границе с бетоном;  $\sigma_1$  – суммарные сжимающие напряжения, возникающие от усилия закрученной гайки на шпильке и от нагрузки  $G$ ;  $\sigma_2$  – суммарные нормальные напряжения, возникающие при торможении транспорта над швом и сопротивлении сдвигу резины

Рисунок 1. – Расчетная модель взаимодействия колеса с узлом крепления шва

В результате расчета получены следующие значения усилий, возникающих в элементах шва при торможении транспорта:

- осевая нагрузка, приходящаяся на одно колесо с учетом его динамического воздействия,  $G = 140$  кН;

- воздействие от торможения  $F_{\text{торм}} = 56$  кН;

- реактивное усилие, возникающее в резиновой прокладке и препятствующее ее сдвигу,  $F_{\text{сд}} = 15$  кН;

- минимальное усилие, возникающее в резинометаллическом блоке при его растяжении или сжатии в результате деформаций пролетного строения,  $F_{\text{сж блока}} = 53,96$  кН;

- суммарная горизонтальная сила, приходящаяся на одну шпильку,  $F_{\text{шп}} = 6,99$  кН;

- усилие затяжки гайки, предотвращающее проскальзывание резиновой прокладки,  $F_{\text{зат}} \geq 28,12$  кН;

- сжимающее напряжение в бетоне в зоне шпильки  $\sigma_1 = 3$  МПа;

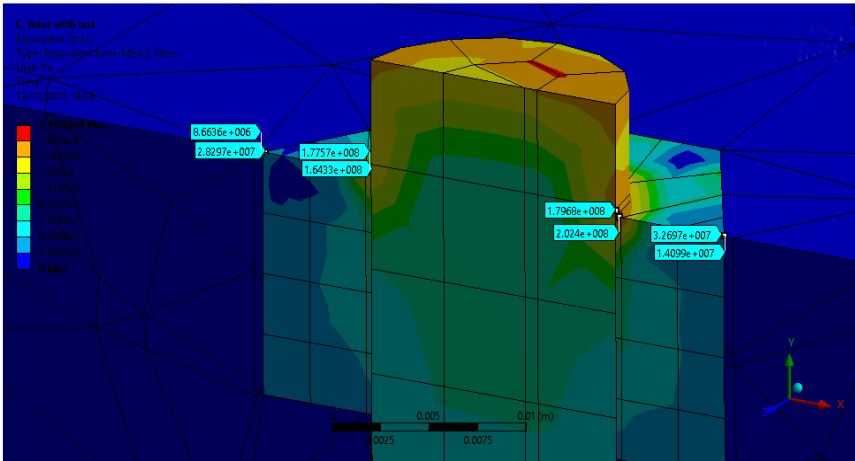
- нормальное напряжение на поверхности бетона  $\sigma_2 = 0,683$  МПа.

Вследствие действия больших динамических транспортных нагрузок шпильки крепления воспринимают значительные периодические напряжения. Причем максимальные напряжения возникают у поверхности бетона в месте контакта со шпилькой. В этом месте в бетоне накапливаются пластические деформации и бетон разрушается. Было рассмотрено два варианта крепления шпильки: первый – непосредственное погружение шпильки в бетон, второй – установка дополнительной гайки, погруженной в бетон у его поверхности, для увеличения площади контакта элемента крепления с бетоном.

Расчет напряжений в зоне контакта крепления шва с бетоном, выполненный методом конечных элементов, показал, что в первом варианте они составляют 102 МПа. Учитывая то, что, согласно данным В.Г. Микульского, упругая работа бетона наблюдается при условии, если напряжения не превышают величины, равной 20 % от расчетной прочности бетона на сжатие. В нашем случае эта прочность бетона должна быть не менее 500 МПа. Получить такой бетон в построечных условиях практически невозможно, поэтому во втором варианте была использована дополнительная гайка, накрученная на шпильку и погруженная в бетон. В этом случае напряжение в зоне контакта (рисунок 2) составило около 14 МПа, что потребовало использовать бетон с прочностью на сжатие не менее 70 МПа. Такой бетон можно получить в построечных условиях при соответствующем подборе состава и обеспечении условий твердения.

С целью рассеивания энергии, передаваемой от колеса на шов, предусмотрен зазор 2 мм между шпилькой и закладным металлическим элементом в резинометаллическом компенсаторе, обеспечивающий деформацию резиновой прокладки при торможении колеса. Учитывая это, резиновая пластина (рисунок 1) должна обладать необходимой деформативностью, обеспечивающей не только герметичность в зоне контакта с бетоном, но и высокую устойчивость к разрушению при многократном воздействии колес. Таким требованиям соответствует неопреновая резина, имеющая высокий ресурс структурной прочности.





**Рисунок 2. – Изополю внутренних напряжений в элементах узла крепления шва с учетом усилия сдвига резиновой пластины при торможении транспорта**

С целью рассеивания энергии, передаваемой от колеса на шов, предусмотрен зазор 2 мм между шпилькой и закладным металлическим элементом в резинометаллическом компенсаторе, обеспечивающий деформацию резиновой прокладки при торможении колеса. Учитывая это, резиновая пластина (рисунок 1) должна обладать необходимой деформативностью, обеспечивающей не только герметичность в зоне контакта с бетоном, но и высокую устойчивость к разрушению при многократном воздействии колес. Таким требованиям соответствует неопреновая резина, имеющая высокий ресурс структурной прочности.

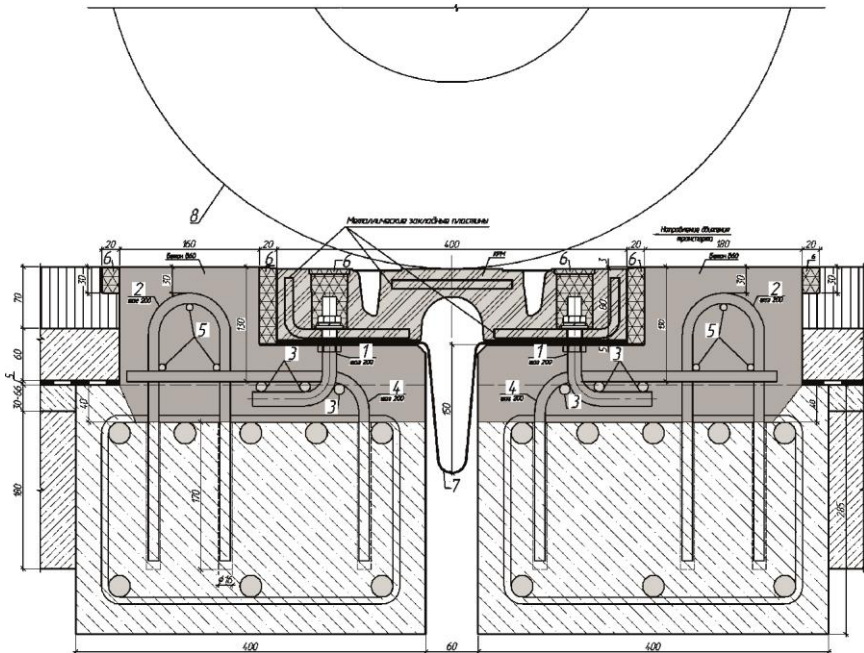
Согласно расчетам, усилие сдвига в резине при торможении составляет 15 кН, перемещения – 2 мм, работа, воспринимаемая резиновой пластиной, при торможении колеса равна 30 Дж. Согласно данным Е.В. Калганкова, работа, которую может воспринимать неопреновая резина до разрушения, составляет  $A_{отказа\ резины} = 27 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>. Поэтому резиновая пластина, рабочий объем которой составляет  $21 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>, способна воспринимать 1,9 млн циклов наезда на шов на грузки АК-100 при условии торможения.

### **В третьей главе представлены объекты и методы исследований.**

Объект исследований – сконструированный на основе расчетной модели деформационный шов (рисунок 3), имеющий резинометаллический компенсатор, который крепится к монолитному бетону с помощью металлических шпилек. Компенсаторы представляют собой резиновые элементы с запаянными внутри них стальными закладными деталями. Конструкция крепления шва позволяет компенсировать воздействие колес транспорта и деформации пролетных строений, обеспечить герметичность и ремонтпригодность шва.

Согласно ТКП 318, на больших пролетах мостов (с непрерывной проезжей частью более 120 м) максимальная продольная деформация шва не превышает

120 мм. Поэтому расчетные деформации горизонтальных перемещений приняты по 60 мм на растяжение и сжатие. Деформации растяжения и сжатия эластичных элементов не должны нарушать сплошность шва, поэтому эластичная составляющая, занимающая участок в сечении шва длиной 60–70 мм, выполнялась из резины с относительной деформативностью более 100 %. Данному условию удовлетворяет выбранная нами неопреновая резина, соответствующая требованиям СТБ 1622.



- 1 – шпилька из нержавеющей стали; 2, 3, 4, 5 – арматурные стержни;  
6 – мастика; 7 – резиновая прокладка, формирующая лоток;  
8 – дополнительная гайка (для увеличения площади контакта с бетоном)**

**Рисунок 3. – Конструкция крепления шва**

Проведенные исследования показали, что бетон должен иметь прочность не менее 70 МПа. По условиям коррозионной стойкости его морозостойкость должна соответствовать марке F200. Для получения такого бетона было предложено:

- использовать в его составе активированный минеральный заполнитель, обработанный раствором солей поливалентных металлов, что позволяет интенсифицировать физико-химические процессы в зоне контакта заполнителей с цементным камнем;

- вводить в его состав микрокремнезем для устранения микродефектов в цементном камне;

- использовать полипропиленовую фибру длиной 12 мм (длина сопоставима с размером крупного заполнителя) для устранения падения прочности от микротрещин, возникающих в процессе укладки и эксплуатации бетона;

- ускорять набор прочности бетона путем его нагрева в оптимальном режиме с помощью инфракрасного излучения.

С целью получения бетона с требуемой прочностью на сжатие не менее 70 МПа на третьи сутки твердения для быстрого выполнения работ был применен метод планирования эксперимента.

Исходным материалом для получения точечных оценок параметров регрессионной модели являлся набор из  $n$  наблюдений над значениями следующих наиболее значимых факторов (таблица 1):

- $x_1$  – содержание микрокремнезема (МК), % от массы цемента;
- $x_2$  – содержание цемента (Ц), кг на м<sup>3</sup> бетона;
- $x_3$  – температура при наборе прочности  $t$ , °С (Т).

В качестве отклика  $y$  использовалась прочность бетона на сжатие  $R_b$ , МПа, на третьи сутки твердения.

Таблица 1. – Интервалы варьирования факторов

Обозначение в переменных		Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
кодированных	натуральных	нижний –1	основной 0	верхний 1	
$x_1$	МК	7,0	10,0	13,0	3,0
$x_2$	Ц	450	500	550	50
$x_3$	Т	30	40	50	10

Для оценки интенсивности движения применялись методы визуального и индукционного контроля проезжающих автотранспортных средств. Согласно ДМД 02191.5.004 среднегодовая суточная интенсивность движения рассчитывается по формуле:

$$N_{ср.г} = N_ч \cdot K_ч \cdot K_д \cdot K_м, \quad (1)$$

где  $N_ч$  – учетная интенсивность движения за определенное (не менее 4 часов) количество часов, в пересчете на авт./сут;

$K_ч$  – коэффициент, учитывающий количество часов непрерывного учета интенсивности движения;

$K_д$  – коэффициент, учитывающий день недели учета интенсивности движения;

$K_м$  – коэффициент, учитывающий месяц учета интенсивности движения.

Для автоматизированного учета интенсивности движения использовались данные индукционного контроля проходящих автомобилей с помощью дорожно-измерительных станций, расположенных вблизи экспериментальных швов. Эти станции позволяли разделить проходящие транспортные средства на 9 классов. С учетом коэффициентов приведения реальной автомобильной нагрузки к расчетной получали данные для определения долговечности швов.

В работе, наряду со стандартными методами, использовали авторские методики. Так, работоспособность шва оценивали по изменению эмиссии шума при проезде автотранспорта по шву. Шумомер устанавливали в створе шва на расстоянии 7,5 м от середины крайней полосы движения и в 200 м от шва на подходе. В зависимости от величины разницы эквивалентного и максимального уровня шума оценивали эксплуатационное состояние шва. Появление дополнительных максимальных звуковых колебаний при проезде по шву свидетельствовало о его выходе из строя.

**В 4 главе изложены результаты экспериментальных исследований элементов шва.**

Резинометаллические элементы шва были сконструированы и испытаны на растяжение–сжатие, возникающие при максимальных горизонтальных перемещениях пролетных стросней мостов. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты испытаний

Номер испытанного блока шва	Фактические размеры блока шва КРМ $L \times b \times h$ , мм	Сила $F_{сж}$ , кН	Перемещение, мм
1	100×40×8	53,96	- 60
2	100×40×8	42,18	+ 60
		53,90	- 62
		42,19	+ 61
Примечание: «+» – растяжение, «-» – сжатие.			

Результаты испытаний подтвердили конструкторские решения и показали, что усилия при максимальной деформации шва не превышают 60 кН, при этом на одну шпильку приходится нагрузка 12 кН, что соответствует принятой модели нагружения (рисунок 2).

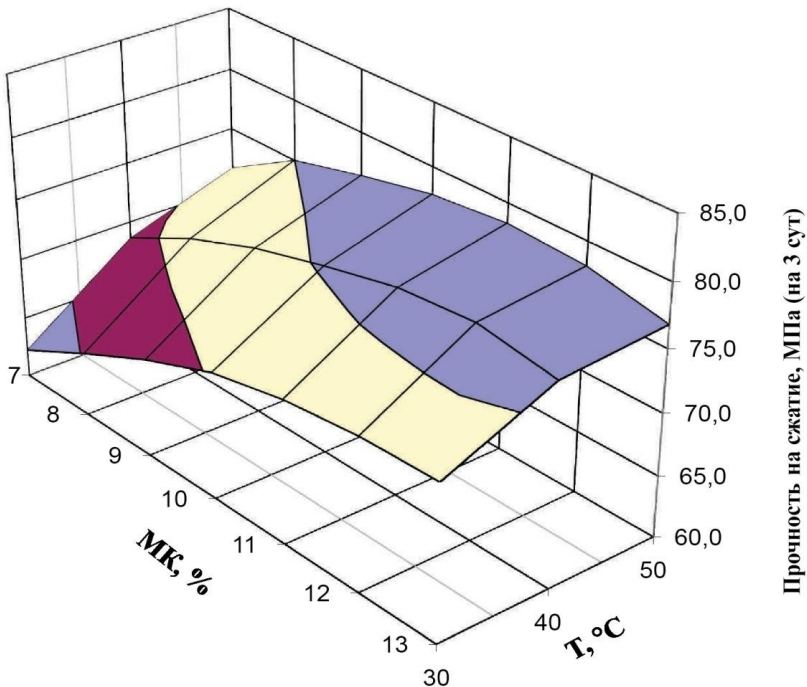
Методом планирования эксперимента был подобран состав высокопрочного бетона и определены оптимальные температурные условия твердения бетона. Был использован трехфакторный план второго порядка.

С учетом наличия аддитивной помехи случайного характера был проведен регрессивный анализ и по экспериментальным данным получена следующая математическая модель:

$$y_i = 74,57 + 3,25x_1 + 2,24x_2 + 3,57x_3 - 3,15x_1^2 - 0,30x_2^2 - 1,05x_3^2 - 0,80x_1x_3,$$

Значение коэффициентов уравнения оценивали по критерию Стьюдента, а пригодность уравнения для расчетов – по критерию Фишера.

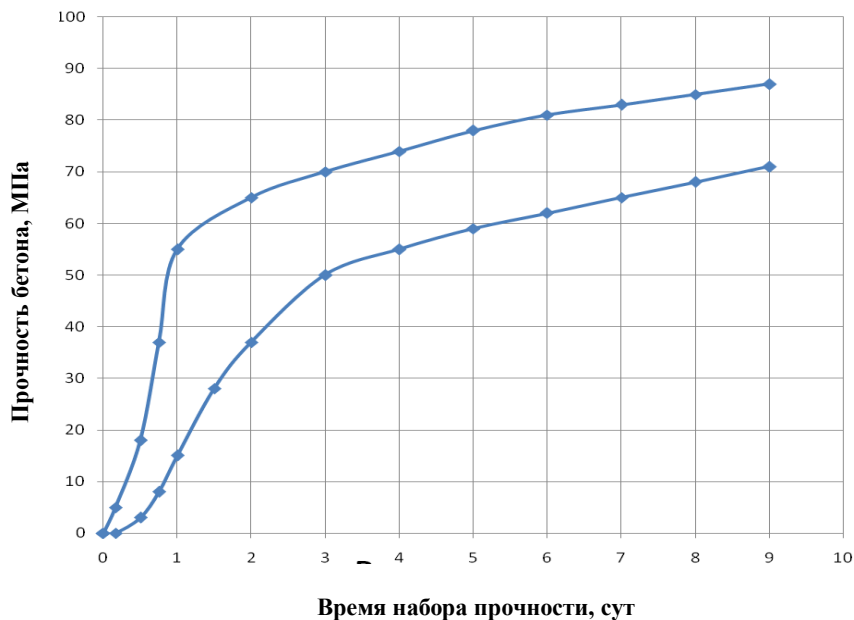
На рисунке 4 представлены зависимости прочности бетона на сжатие от наиболее значимых факторов: содержания микрокремнезема и температуры термостатирования при фиксированном содержании цемента. Из приведенных данных следует, что количество кремнезема должно находиться в пределах 8 %–10 % от массы цемента, а температура прогрева – в пределах 35 °С–45 °С.



**Рисунок 4. – Влияние добавки микрокремнезема (МК) и температуры прогрева (Т) на прочность бетона на 3 суток твердения**

На основе полученных данных был подобран следующий рабочий состав высокопрочного бетона, кг/м<sup>3</sup>: портландцемент М 500Д0 – 500; вода – 135,2; активированный щебень, соответствующий техническому решению ТР-001-2012 ПО «Гранит», фракций: 10–16 мм – 800; 6,3–10 мм – 350; 4,0–6,3 мм – 100; 2–4 мм – 50; песок природный (М<sub>к</sub> = 2,7) – 550; микрокремнезем – 52; фибра – 10,4; гиперпластификатор на основе поликарбоксилатов – 6,76.

Полученный в построчных условиях на путепроводе на пересечении ул. Филимонова и просп. Независимости (г. Минск) бетон указанного состава имел следующие свойства: прочность – 110 МПа, плотность – 2550 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость – F200; водонепроницаемость – W16. При термостатировании при температуре (40 ± 5) °С требуемая прочность бетона была достигнута за 3 суток твердения (рисунок 5), что позволило открыть движение по мостовому полотну без дополнительных ограничений.

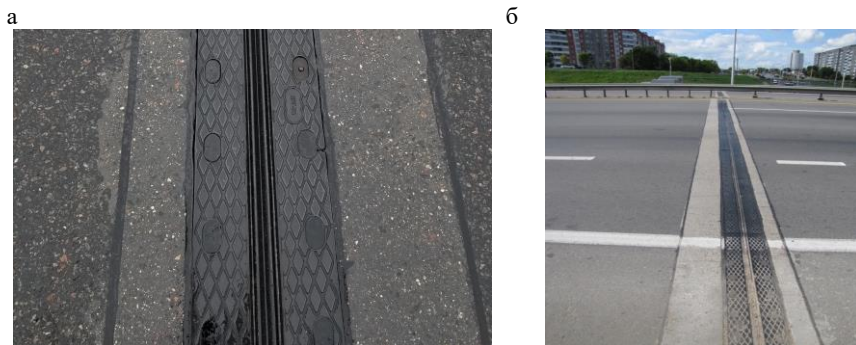


**Рисунок 5. – Набор прочности бетона (верхний график – при применении прогрева, нижний – при нормальных условиях твердения)**

В главе 5 рассмотрены результаты производственной апробации конструктивных и технологических решений. Проведен мониторинг за устроенными швами и процессом их содержания. Выполнена экономическая оценка эффективности применения разработанных конструкций швов.

Данное техническое решение апробировано на Кольцевой автомобильной дороге вокруг г. Минска. Технология устройства швов включала установку в полость, при-

мыкающую к балкам, каркаса из арматуры, к которому крепились шпильки, и заполнение ее бетонной смесью. После уплотнения и выравнивания бетонной смеси на шпильки накручивали дополнительные гайки с погружением их на уровень бетонной поверхности. Для ускорения твердения бетона в построечных условиях его прогревали с помощью инфракрасных пропановых горелок, обеспечивая термостатирование при температуре  $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . После набора прочности на шпильки устанавливали резиновые прокладки и резинометаллические блоки, которые прикручивали гайками с усилием 60 Н·м. Устроенный таким образом шов представлен на рисунке 6.



**Рисунок 6. – Деформационный шов на Минской кольцевой дороге (путепровод на 8 км): а – устроен в 2008 г.; б – состояние в 2019 г.**

Для оценки работоспособности таких швов были выполнены замеры шума на шести экспериментальных объектах, устроенных на первой Кольцевой автомобильной дороге вокруг г. Минска и эксплуатирующихся при относительно одинаковой интенсивности движения (таблица 3). Сроки эксплуатации объектов – от 8 до 10 лет.

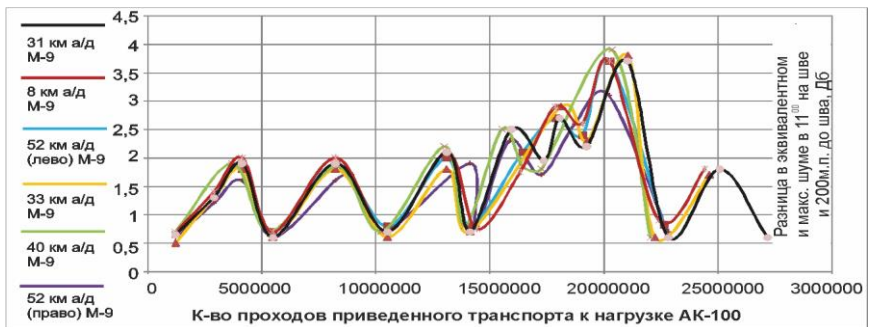
Таблица 3. – Показатели интенсивности движения на первой Кольцевой автомобильной дороге вокруг г. Минска

Наименование дороги	Год проведения измерений	Количество транспортных средств за 50 ч наблюдения	Количество транспортных средств, приведенных к легковым автомобилям, за 50 ч наблюдения	Количество транспортных средств, приведенных к нагрузке АК-100 в год	Количество транспортных средств, приведенных к нагрузке АК-100 с начала наблюдения
1	2	3	4	5	6
КАД	2003	23336	26104	1238635	1238635

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
КАД	2004	28736	35191	1669813	2908448
КАД	2005	21255	26087	1237828	4146276
КАД	2006	23397	28594	1356785	5503061
КАД	2007	47196	57724	2739004	8242065
КАД	2008	56337	69259	3286340	11528405
КАД	2009	62494	75753	3594480	15122884
КАД	2010	69841	84804	4023950	19146834
КАД	2011	74714	90580	4298021	23444855
КАД	2012	77078	93560	4439422	27884277
КАД	2013	72392	88201	4185137	32069415
КАД	2014	72392	88201	4185137	36254552
КАД	2015	72392	88201	4185137	40439690
КАД	2016	72392	88201	4185137	44624827
КАД	2017	74195	94143	4467085	49091912
КАД	2018	69978	86074	4084211	53176124

Разработка методики включала измерение шума на расстоянии 200 м от шва и в его створе. Эквивалентный шум был в обоих случаях был одинаков, а максимальный возле шва, имеющего избыточные деформации, увеличивался. Таким образом, по разности между максимальным и эквивалентным шумом  $\Delta D$  судили о состоянии шва. По результатам проведенных замеров  $\Delta D$  построены графические зависимости от количества проезжающих расчетных автомобилей АК-100 (рисунок 7).



**Рисунок 7. – Зависимость разности уровней максимального и эквивалентного шума от количества проехавших через шов расчетных автомобилей**



Из представленных данных видно, что на начальной стадии эксплуатации нарастает шумовая эмиссия в зоне деформационного шва вследствие расслабления крепления резинометаллических элементов. Дополнительное обжатие прокладок при достижении значения  $\Delta D = 1,5\text{--}2,0$  дБа устраняет эту проблему. Отмечено, что после 4–5 млн проходов расчетных автомобилей появляется необходимость подтяжки гаек до уровня 60 Н·м. Аналогичные операции необходимо проводить через каждые 5–6 млн проходов, что приостанавливает процесс нарастания звуковой эмиссии. После 17–22 млн проходов расчетных автомобилей (что в нашем случае соответствует 8–10 годам эксплуатации) подтяжка гаек не дает требуемого эффекта ( $\Delta D$  превышает 2,0–3,5 дБа). В этом случае проводится замена резиновых прокладок, что обеспечивает снижение шумовой эмиссии до исходного уровня. Таким образом, путем восьмикратной замены прокладок появляется возможность поддержания работоспособности шва на требуемом уровне в течение срока, сопоставимого с установленной долговечностью всего мостового сооружения (60 лет).

Результаты диагностики уровня шума на других швах (на мостах и путепроводах на дорогах М-4, М-5 и др. (рисунок 8)) подтверждены данными, полученными на Минской кольцевой автомобильной дороге.

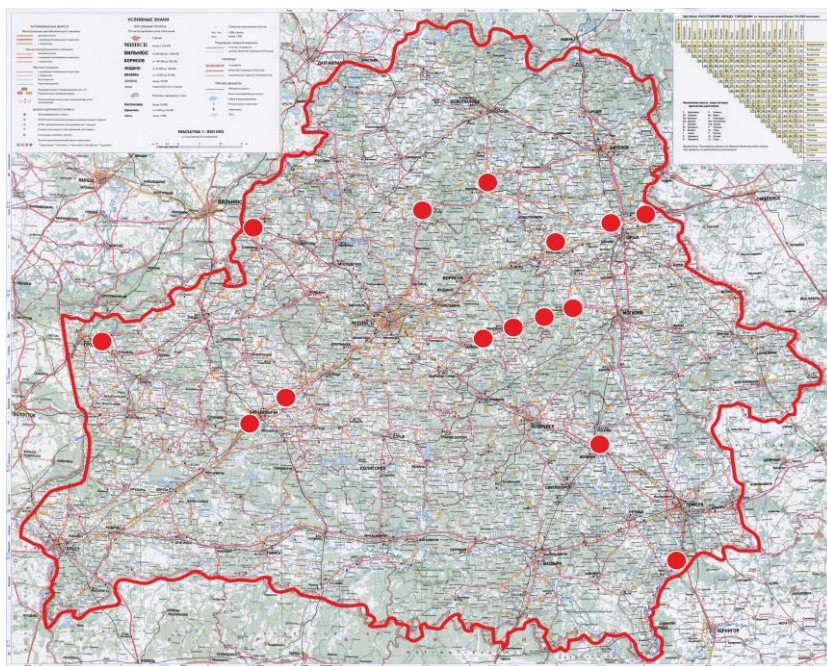


Рисунок 8. – Местоположение устроенных швов на дорогах Республики Беларусь

Экономическая эффективность предложенного технического решения была рассчитана по Методике определения эффективности инвестиций в строительство, реконструкцию, ремонт и содержание автомобильных дорог, утвержденной приказом Департамента «Белавтодор» Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 21.10.2005 № 209. Расчет определяет достижение эффекта от увеличения срока службы шва и меньшей стоимости ремонта за весь период эксплуатации мостового сооружения. Расчетные показатели приведены к году начала производства работ с помощью ставки дисконта в размере 4,66 %.

В качестве репрезентативного объекта принято возведение моста через р. Березину на автомобильной дороге М-6 Минск – Гродно – граница Республики Польша (Брузги) на км 100,4 с общей длиной швов 52 пог. м. По расчету на перспективу 60 лет показатель экономической эффективности составил 2353 руб. на каждом погонном метре.

После рассмотрения на заседаниях научно-технических советов ведущих отраслевых научно-исследовательских институтов предложенные деформационные швы рекомендованы для применения на мостовых сооружениях Беларуси, Российской Федерации, Республики Казахстан.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана расчетная модель работы деформационного шва под тяжелой транспортной нагрузкой в условиях температурных деформаций пролетных строений моста, отличающаяся тем, что в ней учтены особенности поглощения части нагрузки при торможении тяжелых транспортных средств и упругого ее восприятия в зоне крепления к бетонному основанию [2, 3, 4].

2. На основе предложенной модели работы деформационного шва проведена оценка его нагружения при воздействии транспорта в процессе эксплуатации моста [11], разработана оптимальная конструкция деформационного шва и предложена система его крепления, которые обеспечивают устойчивое восприятие деформаций пролетных строений мостов и динамической нагрузки от транспортных средств, при этом резинометаллический блок обеспечивает перемещение концов пролетных строений в пределах 120 мм и воспринимает многократную нормативную транспортную нагрузку АК-100 с учетом возможного экстренного торможения на нем [1, 2, 3, 4, 6, 7, 12].

3. Разработана технология бетонирования зоны крепления шва в построечных условиях, включающая совместное использование в составе бетона активированного заполнителя, микрокремнезема, гиперпластификатора, дисперсной арматуры, при условии термостатирования при температуре  $(40 \pm 5) ^\circ\text{C}$  обеспечивающая достижение прочности бетона более 70 МПа, что соответствует его упругой работе при эксплуатационных воздействиях, и позволяющая открыть движение транспорта в течение трех суток после завершения бетонирования [4, 5, 6, 8].

4. Предложен метод акустической диагностики работоспособности шва, заключающийся в измерении разности между максимальным и эквивалентным уровнями шума в створе шва на расстоянии 7,5 м от середины проезжей части крайней поло-

сы движения, что позволяет установить несоответствие нормальному режиму эксплуатации шва в случае превышения этой разницы больше чем на 2 дБа [4, 9, 10].

5. Установлены экспериментальные параметры работы деформационного шва, включающие обжатие резиновых прокладок до уровня 0,9 МПа с помощью подтяжки гаек до 60 Н·м и периодическую (через 17–22 млн проходов расчетных автомобилей) замену этих прокладок, что обеспечивает требуемую работоспособность шва в течение срока, соответствующего долговечности всей мостовой конструкции [4, 9, 10, 11].

**Рекомендации по практическому использованию результатов работы.** Результаты исследований внедрены в ОАО «Мостострой», РУП «Минскавтодорцентр» (приложения Д, М, Р, С) и рекомендуются к использованию мостостроительными и дорожными эксплуатационными организациями для:

- налаживания серийного выпуска разработанных резинометаллических блоков шва;
- организации производства и применения смесей для бетонирования зоны крепления швов в построечных условиях согласно разработанной рецептуре и предложенным условиям обеспечения их твердения;
- организации содержания швов согласно предложенной методике, включающей акустическую диагностику работы швов, их периодическую профилактику и ремонт с заменой износившихся резиновых прокладок.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых журналах и сборниках**

1. Эсаулов, С. Л. Расчет расстояния между швами расширения монолитных аэродромных покрытий / С. Л. Эсаулов, О. В. Канунников, Р. Г. Кротов // Автомобильные дороги. – 1993. – № 8. – С. 23–25.
2. Рубцова, Т. А. Конструкция деформационного шва с резинометаллическим компенсатором КРМ-120, обеспечивающим перемещения до 120 мм / Т. А. Рубцова, В. А. Зверинский, Р. Г. Кротов // Автомобильные дороги и мосты. – 2013. – № 1. – С. 54–58.
3. Кротов, Р. Г. Напряженно-деформированное состояние узла крепления деформационного шва с резинометаллическим компенсатором КРМ-120 / Р. Г. Кротов, В. Н. Рябцев // Автомобильные дороги и мосты. – 2015. – № 2. – С. 80–87.
4. Кротов, Р. Г. Высокопрочный бетон в конструкциях швов на автодорожных мостах / Р. Г. Кротов, Т. А. Чистова // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. научных трудов. – 2015. – Вып. 7. – С. 65–77.

### **Статьи в других научных изданиях**

5. Кротов, Р. Г. Проблемы применения щебеночно-мастичных деформационных швов на мостах и путепроводах / Р. Г. Кротов, Д. В. Барковский, С. С. Исаков, А. В. Бусел // Строительство и эксплуатация автомобильных до-

рог и мостов : сб. научных трудов / РУП «БелдорНИИ». – Минск, 2003. – Вып. 15. – С. 99–108.

6. Бусел, А. В. Поведение деформационных швов на автодорожных мостах при интенсивном движении транспорта / А. В. Бусел, Р. Г. Кротов, Т. А. Чистова // Дороги Содружества Независимых Государств. – 2015. – № 6 (47). – С. 91–95.

### **Материалы конференций**

7. Кротов, Р. Г. Высокопрочный бетон в местах крепления деформационных швов на мостах / Р. Г. Кротов // Инновации в технике и технологии дорожно-строительного комплекса : материалы Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 10–11 апреля 2014 г. / БНТУ ; редкол. : А. В. Бусел [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 55–59.

8. Кротов, Р. Г. Твердение высокопрочного бетона при устройстве деформационного шва мостового сооружения в зимних условиях / Р. Г. Кротов // Инновации в дорожном строительстве : междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 декабря 2016 г. : сб. докл. – Минск, 2016. – С. 175–182.

9. Кротов, Р. Г. Диагностика состояния деформационных швов с резинометаллическим компенсатором, назначение сроков ремонта в условиях интенсивного движения транспорта (динамических нагрузок) / Р. Г. Кротов // Инновации в дорожном строительстве : междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 декабря 2016 г. : сб. докл. – Минск, 2016. – С. 183–191.

10. Бусел, А. В. Роль деформационных швов на мостах и путепроводах в обеспечении безопасности проезда / А. В. Бусел, Р. Г. Кротов, А. Н. Наумовец // Автомобильные дороги: безопасность и надежность : междунар. юбил. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 ноября 2018 г. : сб. докл. – Минск, 2018. – С. 28–36.

11. Busel, A., Krotov, R. The design and composition of expansion joints on big-span bridges with intensive heavy-duty traffic [Electronic resource] // Transportation Research Procedia. – 2016. – № 14. – P. 3953–3962. – Access mode : [https://ac.elscdn.com/S2352146516304951/1s2.0S2352146516304951main.pdf?\\_tid=16e8c46a1b46451ab09f1af2f2819428&acdnat=1551709176\\_8390750aa524ceac5f05728fcb e8e24e](https://ac.elscdn.com/S2352146516304951/1s2.0S2352146516304951main.pdf?_tid=16e8c46a1b46451ab09f1af2f2819428&acdnat=1551709176_8390750aa524ceac5f05728fcb e8e24e). – Access date : 22.08.2016.

### **Патенты**

12. Деформационный шов пролетного строения моста : пат. 10373 Респ. Беларусь : МПК Е 01D 19/06, Е 01С 11/12 / Рубцова Т. А., Кротов Р. Г. ; заявитель и патентообладатель государственное предприятие «БелдорНИИ». – № u 20130787 ; заявл. 07.10.2013 ; опубл. 30.10.2014. – 4 с. : ил.

## РЭЗІЮМЭ

Кротаў Радзiен Геннадзьевiч

### Павышэнне даўгавечнасці дэфармацыйных швоў на пралётных пабудовах мастоў ва ўмовах iнтэнсіўнага руху транспарту

**Ключавыя словы:** дэфармацыйны шоў, пралет маста, рэзiнаметалiчны элемент, высокатрывалы бетон, пругкая стадыя, фiзiка-механiчныя ўласцiвасцi, акустычная эмiсiя.

**Мэта працы:** стварыць даўгавечныя дэфармацыйныя швы, канструкцыя якiх, сiстэма мацавання i прэвентыўныя мерапрыемствы па падтрыманню iх працаздольнасцi забяспечваюць надзейнае ўспрыманне дэфармацый пралётных пабудоў мастоў i iнтэнсіўнага дынамічнага ўздзеяння цяжкавагавага транспарту на працягу разлiковага перыяду эксплуатацыi маставага збудавання.

**Метады даследавання:** у тэарэтычных даследаваннях выкарыстаны метады аналізу i навуковага прагназавання, статыстычнай апрацоўкi вынікаў выпрабаванняў, у эксперыментах ужытыя метады планавання эксперыменту, праграмны комплекс аналізу напружанняў метадам канчатковых элементаў. Пры выпрабаваннях высокатрывалага бетону, металу i гумы, якiя выкарыстоўваюцца пры ўстройванні дэфармацыйных швоў, ўжывалiся атэставаныя ў адпаведнасцi з патрабаваннямi СТБ, ДАСТ i ТУ прыборы i абсталяванне.

Узровень шуму вымяраўся з дапамогай распрацаванай аўтарам метадыкi.

**Атрыманыя вынікi i iх навізна:** распрацаваны новая канструкцыя дэфармацыйнага шва, састаў i тэхналогiя для атрымання высокатрывалага бетону ва ўмовах будаўнiчай пляцоўкi, тэхналогiя ўстройвання шва, сiстэма манiторынгу яго эксплуатацыйнай прыдатнасцi. Распрацаваны арыгiнальныя рэцэптуры бетонаў для аманалiчвання зон iх мацавання i тэхналогii ўстройвання i ўтрымання швоў. Навiзна тэхнiчнага рашэння пацверджана патэнтам.

Выканана вытворчая апрацацыя вынікаў дысертацыi, якая пацвердзiла магчымасць **практычнага прымянення** швоў, здольных захоўваць эксплуатацыйную прыдатнасць ва ўмовах iнтэнсіўнага руху транспарту на працягу доўгага часу.

Вынікi даследаванняў рэкамендуюцца да выкарыстання моста-будаўнiчымi i дарожна-эксплуатацыйнымi арганiзацыямi.

## РЕЗЮМЕ

**Кротов Родион Геннадьевич**

### **Повышение долговечности деформационных швов на пролетных строениях мостов в условиях интенсивного движения транспорта**

**Ключевые слова:** деформационный шов, пролет моста, резинометаллический элемент, высокопрочный бетон, упругая стадия, физико-механические свойства, акустическая эмиссия.

**Цель работы:** создать долговечные деформационные швы, конструкция которых, система крепления и превентивные мероприятия по поддержанию их работоспособности обеспечивают надежное восприятие деформаций пролетных строений мостов и интенсивного динамического воздействия тяжеловесного транспорта в течение расчетного периода эксплуатации мостового сооружения.

**Методы исследования:** в теоретических исследованиях использованы методы анализа и научного прогнозирования, статистической обработки результатов испытаний, в экспериментах применены метод планирования эксперимента, программный комплекс анализа напряжений методом конечных элементов. При испытаниях высокопрочного бетона, металла и резины, используемых при устройстве деформационных швов, применялись аттестованные в соответствии с требованиями СТБ, ГОСТ и ТУ приборы и оборудование.

Уровень шума измерялся с помощью разработанной автором методики.

**Полученные результаты и их новизна:** разработаны новая конструкция деформационного шва, состав и технология для получения высокопрочного бетона в условиях строительной площадки, технология устройства шва, система мониторинга его эксплуатационной пригодности. Разработаны оригинальные рецептуры бетонов для омоноличивания зон их крепления и технологии устройства и содержания швов. Новизна технического решения подтверждена патентом.

Выполнена производственная апробация результатов диссертации, подтверждающая возможность **практического применения** швов, способных сохранять эксплуатационную пригодность в условиях интенсивного движения транспорта в течение длительного времени.

Результаты исследований рекомендуются к использованию мостостроительными и дорожно-эксплуатационными организациями.

## SUMMARY

Rodion Gennad'evich Krotov

### **Increase of durability of expansion joints of the bridge span structures in conditions of heavy traffic**

**Key words:** expansion joint, bridge span, rubber-metal element, high-strength concrete, elastic stage, physical and mechanical characteristics, acoustic emission.

**Objective:** to create durable deformation joints, the design of which, the fastening system and preventive measures to maintain their performance provide a reliable perception of deformations of bridge span structures and the intense dynamic loading of heavy transport during the design period of operation of the bridge structure.

**Research methods:** the theoretical studies include methods of analysis and scientific prediction, statistical processing of test results, the method of experiment planning, software complex stress analysis by finite element method. When testing high-strength concrete, metal and rubber, used in the construction of expansion joints, devices and equipment certified in accordance with the requirements of STB, GOST and TU were used.

The noise level was measured using the method developed by the author.

**The results and their innovation:** a new design of expansion joint, composition and technology for manufacturing of high-strength concrete in a construction site, the technology of expansion joint construction, the technology of monitoring the expansion joint operational suitability are developed. The original concrete compositions for concreting of areas of expansion joints attachment and technologies on expansion joints construction and maintenance are developed.

The production approbation of the dissertation results was performed; it confirmed the possibility of practical application of expansion joints that maintain operational suitability in conditions of heavy traffic for a long period of time.

The research results are recommended to be used as a practical guide for bridge-building and road-maintenancing organizations.

Научное издание

**КРОТОВ**  
Родион Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ НА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ  
МОСТОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО  
ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

---

Подписано в печать .05.2019.

Бумага офсетная. Ризография.

Формат 60×84 1/16.

Уч.-изд. л. 1,0. Усл. печ. л. 1,39.

---

Тираж экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский национальный технический университет  
220013, г. Минск, просп. Независимости, 65

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий от 12.02.2014 № 1/173