

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ШВА С РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОМПЕНСАТОРОМ КРМ-120

## STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF KRM-120 EXPANSION JOINT ATTACHMENT FITTING WITH RUBBER-METAL COMPENSATOR



**Р. Г. Кротов,**  
директор ООО «Прогрессивные  
технологии бетона», г. Минск,  
Беларусь

**В. Н. Рябцев,**  
старший преподаватель  
кафедры «Сопротивление  
материалов и теория упругости»  
Белорусского национального  
технического университета,  
г. Минск, Беларусь

*В статье рассмотрена надежность узла крепления деформационного шва КРМ-120 при эксплуатационных и температурно-климатических воздействиях. На основании полученных результатов обоснованы требования к применяемым материалам, а также к содержанию деформационного шва в пригодном эксплуатационном состоянии на протяжении жизненного цикла.*

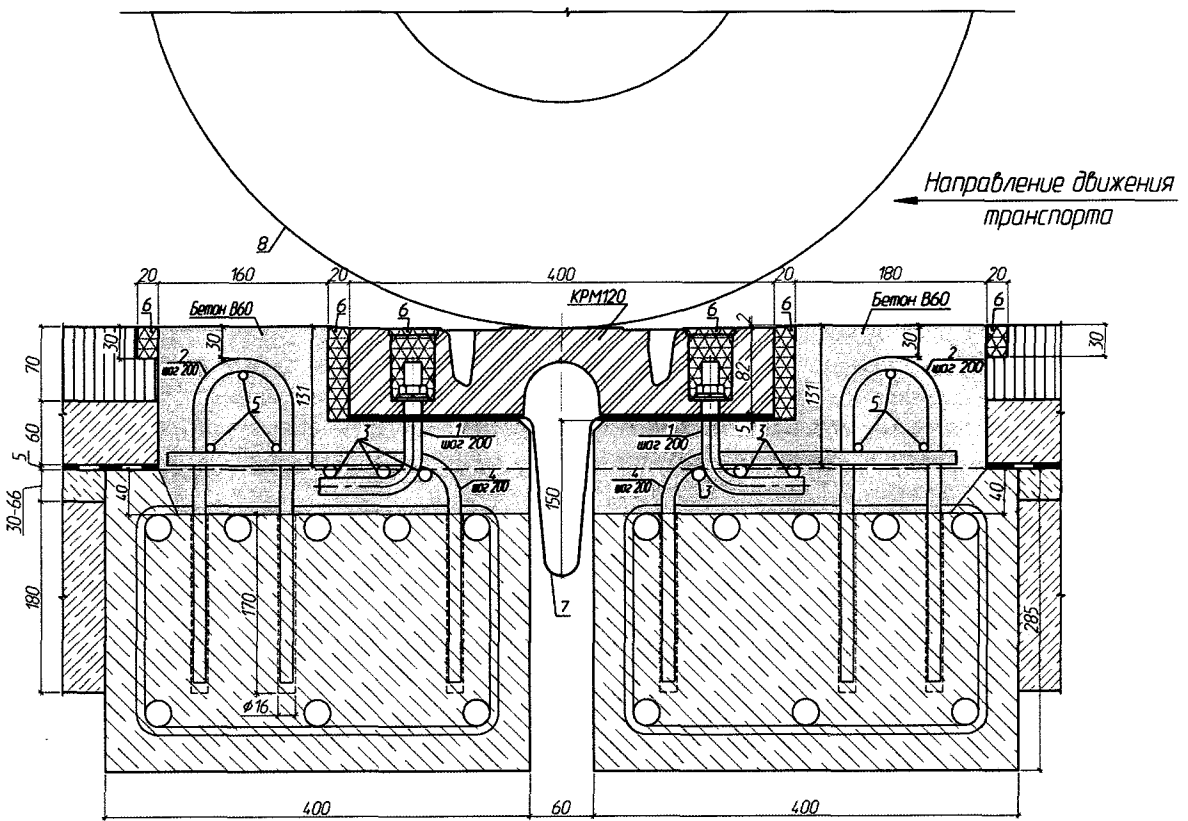
*The paper considers reliability of KRM-120 expansion joint attachment fitting under operational, thermal and climatic impacts. Based on the obtained results, the requirements for the materials to be used and for maintaining the expansion joint in suitable operating condition throughout the life cycle were substantiated.*

### Введение

Деформационный шов (ДШ) подвергается различного рода эксплуатационным и климатическим воздействиям, вызывающим его повреждение. Разрушение ДШ приводит к резкому увеличению динамических воздействий от транспорта на конструктивные элементы моста. В наибольшей степени таким воздействиям подвергается дорожная одежда в зоне примыкания к ДШ. Кроме того, через поврежденный деформационный шов начинает просачиваться вода, а также растворы противогололедных материалов, которые в дальнейшем попадают на несущие конструкции моста и вызывают их коррозионные разрушения. Поскольку наибольшие механические напряжения возникают в зоне крепления ДШ к бетонному основанию, это и является предметом рассмотрения в данной статье.

### Взаимодействие колеса с деформационным швом

При высокой интенсивности движения автомобильного транспорта (например, на Минской кольцевой автомобильной дороге на отдельных участках она составляет более 100 тыс. автомобилей в сутки) применяются ДШ с резинометаллическим компенсатором, в частности КРМ-120. При наезде колеса на шов (рис. 1) в узле крепления в момент торможения возникают следующие воздействия, передающиеся на блок ДШ: воздействие от веса автомобиля; воздействие от торможения [1] и воздействие от растяжения или сжатия компенсатора КРМ-120, вызванное температурными изменениями [2]. Эти воздействия передают-



1 – шпилька из нержавеющей стали; 2, 3, 4, 5 – арматурные стержни; 6 – мастика; 7 – резиновая пластина; 8 – колесо

Рисунок 1 – Деформационный шов КРМ-120

ся на бетонное основание через шпильки крепления и резиновую пластину под швом. Блок ДШ крепится к бетонному основанию пятью шпильками с каждой стороны, расстояние между шпильками 200 мм.

Для оценки усилий в бетоне была принята физическая модель взаимодействия колеса с узлом крепления (рис. 2).

Были рассмотрены усилия, возникающие при эксплуатационном воздействии в зоне шпильки крепления.

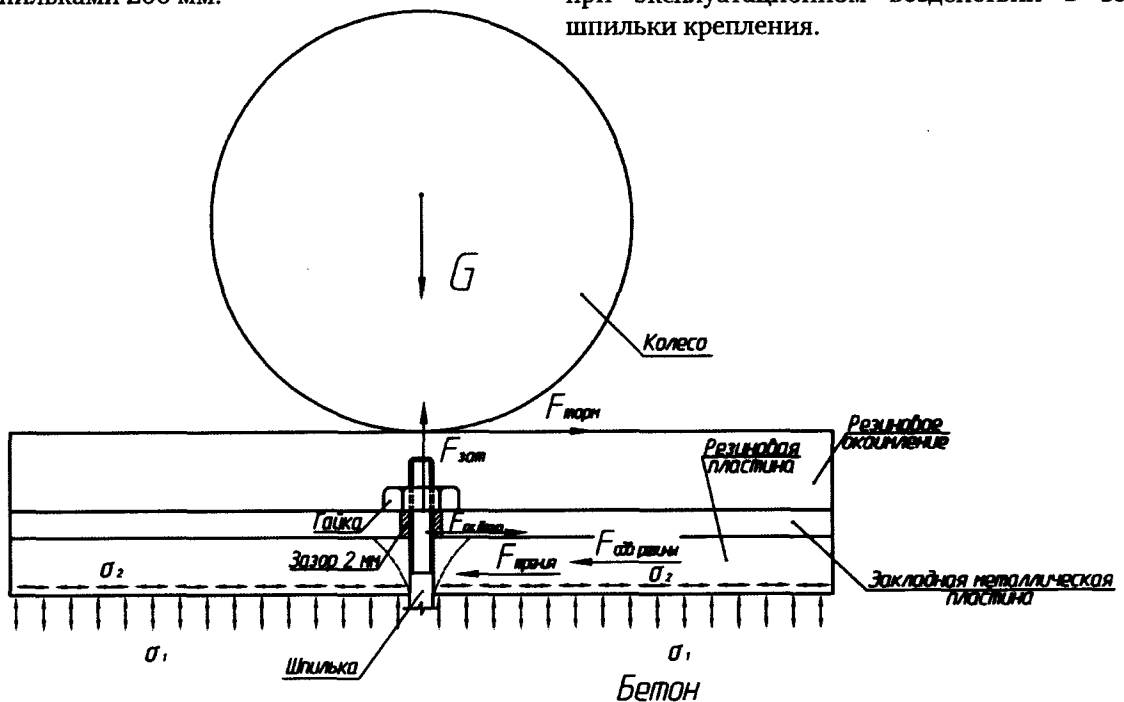


Рисунок 2 – Физическая модель взаимодействия колеса с узлом крепления ДШ

При оценке усилия от воздействия собственного веса автомобиля учитывалась нагрузка 14 т (для мостовых сооружений), приходящая на ось расчетного автомобиля.

Усилие от торможения рассматривалось в двух вариантах. В первом варианте учитывался полный вес автомобиля и коэффициент трения в момент его торможения. Во втором варианте оценивалась работа сил торможения согласно СТБ 1641 [3] с учетом нормативного замедления и длины тормозного пути.

Кроме того, определялось усилие, возникающее в резиновой пластине под блоком КРМ-120 при ее сдвиге во время торможения. Толщина резиновой пластины – 7 мм.

В результате были получены следующие данные.

Воздействие от собственного веса автомобиля  $G$ , кН, в зоне шпильки крепления с учетом коэффициента динамики составляло

$$G = F_{\text{трансп}} \cdot k_d / 2, \quad (1)$$

где  $F_{\text{трансп}}$  – нагрузка на ось расчетного автомобиля (115 кН);

$k_d$  – коэффициент динамики, равный 2 согласно [4];

2 – количество колес на оси.

Таким образом,

$$G = 140\,000 \cdot 2 / 2 = 140 \text{ кН.}$$

Эта сила согласно рисунку 3 действует на половину блока ДШ ( $S = 150 \text{ мм}$  (ширина закладной детали)  $\cdot 200 \text{ мм}$  (шаг шпилек в креплении блока) =  $30\,000 \text{ мм}^2$ ).

Воздействие от торможения  $F_{\text{торм}}$  определим двумя разными способами.

В первом случае с учетом коэффициента трения между колесом и резинометаллическим компенсатором

$$F_{\text{торм}} = G \cdot \mu, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент сцепления колеса с покрытием.

Принимаем его как для дорог с асфальтобетонным покрытием,  $\mu = 0,4$  согласно [5], тогда получаем  $F_{\text{торм}} = 56 \text{ кН}$ .

Учитывая, что эта нагрузка действует на половину блока ДШ, на одну шпильку приходится сила  $56 \text{ кН} : 5 = 11,2 \text{ кН}$ .

Во втором случае учитывалась длина нормативного тормозного пути и расчетная скорость движения автопоезда согласно СТБ 1641 [3] и [5]:

$$F_{\text{торм}} \cdot S_{\text{т}} \cdot n = (mv^2) / 2, \quad (3)$$

$$\text{откуда } F_{\text{торм}} = (mv^2) : 2 \cdot S_{\text{т}} \cdot n,$$

где  $m$  – масса автопоезда,  $m = 40 \text{ т}$ ;

$v$  – расчетная скорость движения, равная  $40 \text{ км/ч}$  ( $11,1 \text{ м/с}$ );

$S_{\text{т}}$  – длина тормозного пути,  $S_{\text{т}} = 15 \text{ м}$ ;

$n$  – количество колес автопоезда,  $n = 14$ .

После расчета получаем  $F_{\text{торм}} = 11,7 \text{ кН}$ . На шпильку в этом случае действует сила  $11,7 \text{ кН} : 5 = 2,34 \text{ кН}$ .

Поэтому примем воздействие от торможения равным  $56 \text{ кН}$ .

При воздействии нагрузки от торможения нижняя резиновая пластина под металлической закладной деформируется и возникает реактивное усилие  $F_{\text{сд}}$ , препятствующее сдвигу.

Исходя из конструкции шва, зазор между металлической закладной и шпилькой составляет  $2 \text{ мм}$ , а толщина резиновой пластины  $7 \text{ мм}$  (рис. 4).

Напряжение сдвига  $\tau_{\text{сд}}$ , возникающее в резине при сдвиге на  $2 \text{ мм}$ , определяется по формуле

$$\tau_{\text{сд}} = G_{\text{сд}} \cdot \gamma, \quad (4)$$

где  $G_{\text{сд}}$  – модуль сдвига, который для резиновой пластины согласно [6] составляет  $1,8 \text{ МПа}$ ;

$\gamma$  – угол сдвига резиновой пластины, в нашем случае  $\gamma = 0,286 \text{ рад}$ .

Таким образом, напряжение сдвига  $\tau_{\text{сд}}$  равно  $0,5 \text{ МПа}$ .

Усилие сдвига  $F_{\text{сд}}$ , которое компенсируется деформацией резины, рассчитывается по формуле

$$F_{\text{сд}} = \tau_{\text{сд}} \cdot S = \quad (5)$$

$$= 0,5 \cdot 0,03 = 15 \text{ кН,}$$

где  $S$  – площадь резиновой пластины под металлической закладной в зоне шпильки.

Для определения воздействия от максимального го-

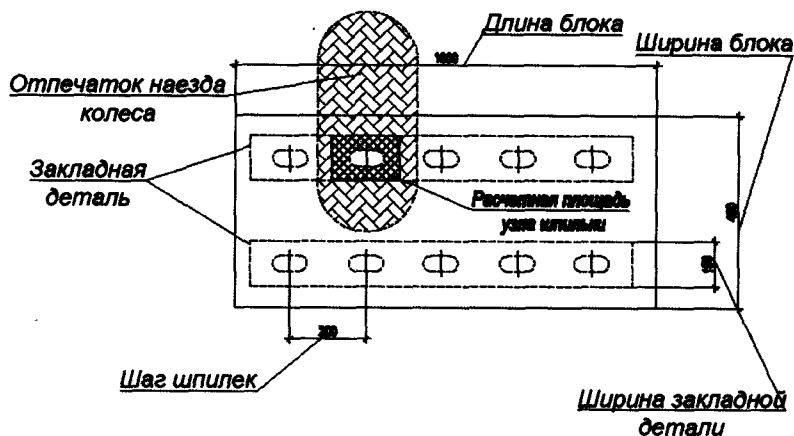


Рисунок 3 – Конструкция блока деформационного шва КРМ-120

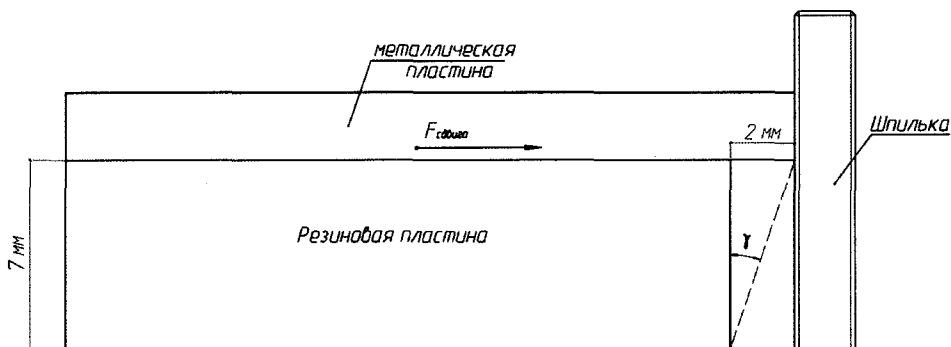


Рисунок 4 – Сдвиг резиновой пластины

горизонтального перемещения компенсатора (60 мм) провели эксперимент, описанный в публикации [2].

Согласно испытаниям (таблица 1), нагрузка при перемещении на 60 мм составила 53,96 кН. Соответственно, на одну шпильку действует сила  $53,96 \text{ кН} : 5 = 10,8 \text{ кН}$ .

Таблица 1 – Сила, возникающая при перемещении ДШ

Номер испытанного блока ДШ	Фактические размеры блока ДШ КРМ-120 $L \times b \times h$ , мм	Сила F, кН	Перемещение, мм
1	100 × 40 × 8	53,96	-60
		68,68	-72
		42,18	60
		58,86	120
2	100 × 40 × 8	53,90	-62
		69,00	-72
		42,19	61
		60,00	120

Примечание – «+» – растяжение, «-» – сжатие.

Исходя из представленных выше расчетов, горизонтальная сила, действующая на одну шпильку, составляет:

$$F_{\text{шп}} = (F_{\text{торм}} + F_{\text{ск}}) : 5 - F_{\text{сд}} = (56 + 53,96) : 5 - 15 = 6,99 \text{ кН}. \quad (6)$$

Таблица 2 – Ориентировочные значения моментов затяжки и усилий предварительной затяжки для винтов из нержавеющей и кислотостойких сталей А2/А4

Резьба	Класс прочности 70		Класс прочности 80	
	Усилие предварительной затяжки, Н	Момент затяжки, Н·м	Усилие предварительной затяжки, Н	Момент затяжки, Н·м
М 5	3000	3,5	4750	4,7
М 6	6200	6	6700	8
М 8	12 200	16	13 700	22
М 10	16 300	32	22 000	43
М 12	24 200	56	32 000	75
М 16	45 000	135	60 000	180
М 20	71 000	455	140 000	605
М 30	191 000	1050	255 000	1400

Материал: сталь А2/А4.

Предел текучести при растяжении  $R_p$ : для класса прочности 70 – 450 Н/мм; для класса прочности 80 – 600 Н/мм.

Кроме того, при расчете напряжений в бетонном основании надо учитывать, что при монтаже блока КРМ-120 гайка на шпильке затягивается с усилием  $F_{\text{зат}}$ , которое согласно таблице 2 создает напряжение, передающееся через металлическую пластину на бетонное основание. При использовании шпилек с резьбой М16 и шагом 1,5 и при крутящем моменте 180 Н·м усилие составляет 60 кН. Это усилие передается на часть металлической закладной пластины, поэтому составляет  $60 \text{ кН} \cdot 5 = 300 \text{ кН}$ . Напряжение под металлической пластиной составляет  $\sigma_1 = F_{\text{зат}} : S = 300 : 0,15 = 2 \text{ МПа}$ .

Расчет минимального усилия затяжки, предотвращающей скольжение резины, производится по формуле

$$F_{\text{тр}} \geq F_{\text{сд}} \cdot k_{\text{безоп}}, \quad (7)$$

где  $k_{\text{безоп}}$  принимаем равным 1,5.

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{зат}} \cdot \mu, \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения, принимаемый равным 0,8.

Откуда следует  $F_{\text{зат}} = 22,5 : 0,8 = 28,125 \text{ кН}$ .

По методу интерполяции (таблица 2) определяем требуемый момент затяжки, который будет равен 84,4 Н·м.

Таким образом, от усилия затяжки закрученной гайки и давления от колеса возникают суммарные сжимающие напряжения  $\sigma_1$ :

$$\sigma_1 = F_{\text{зат}} : S + P, \quad (9)$$

где  $F_{\text{зат}}$  – усилие предварительной затяжки гайки (60 кН) с диаметром резьбы М16 (из конструкторской документации) (таблица 1);

$S$  – площадь закладной металлической детали (30 000 мм<sup>2</sup> – из рисунка 3);

$P$  – давление в шинах, равное 1 МПа.

В результате расчета  $\sigma_1 = 3$  МПа.

От тормозного воздействия автомобиля  $F_{\text{торм}}$  и от перемещения компенсатора  $F_{\text{ск}}$  возникает суммарное напряжение  $\sigma_2$ :

$$\sigma_2 = (F_{\text{торм}} + F_{\text{ск}} : 5) : S, \quad (10)$$

где  $F_{\text{торм}}$  – согласно формуле (2) – 56 кН;

$F_{\text{ск}}$  – сжатие блока ДШ, согласно таблице 1 – 53,96 кН;

5 – количество шпилек;

$S$  – согласно рисунку 3 – 30 000 мм<sup>2</sup>.

Площадь контакта колеса с покрытием равна  $3,14 \cdot (0,47 : 2)^2 = 0,1734$  м<sup>2</sup>.

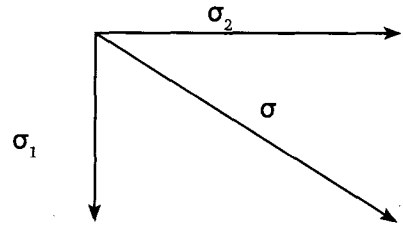
$$\text{В итоге, } \sigma_2 = 56 : 0,1734 + (53,96 : 5) :$$

$$: (0,15 \cdot 0,2) = 0,683 \text{ МПа.}$$

Суммарное напряжение определяем векторным сложением  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ :

$$\sigma = (\sigma_2^2 + \sigma_1^2)^{0,5}, \quad (11)$$

$$\sigma = 3,08 \text{ МПа.}$$



Согласно вышепредставленным расчетам, мы получили значения горизонтальной и вертикальной сил, действующих на шпильку (рис. 5, вариант 1).

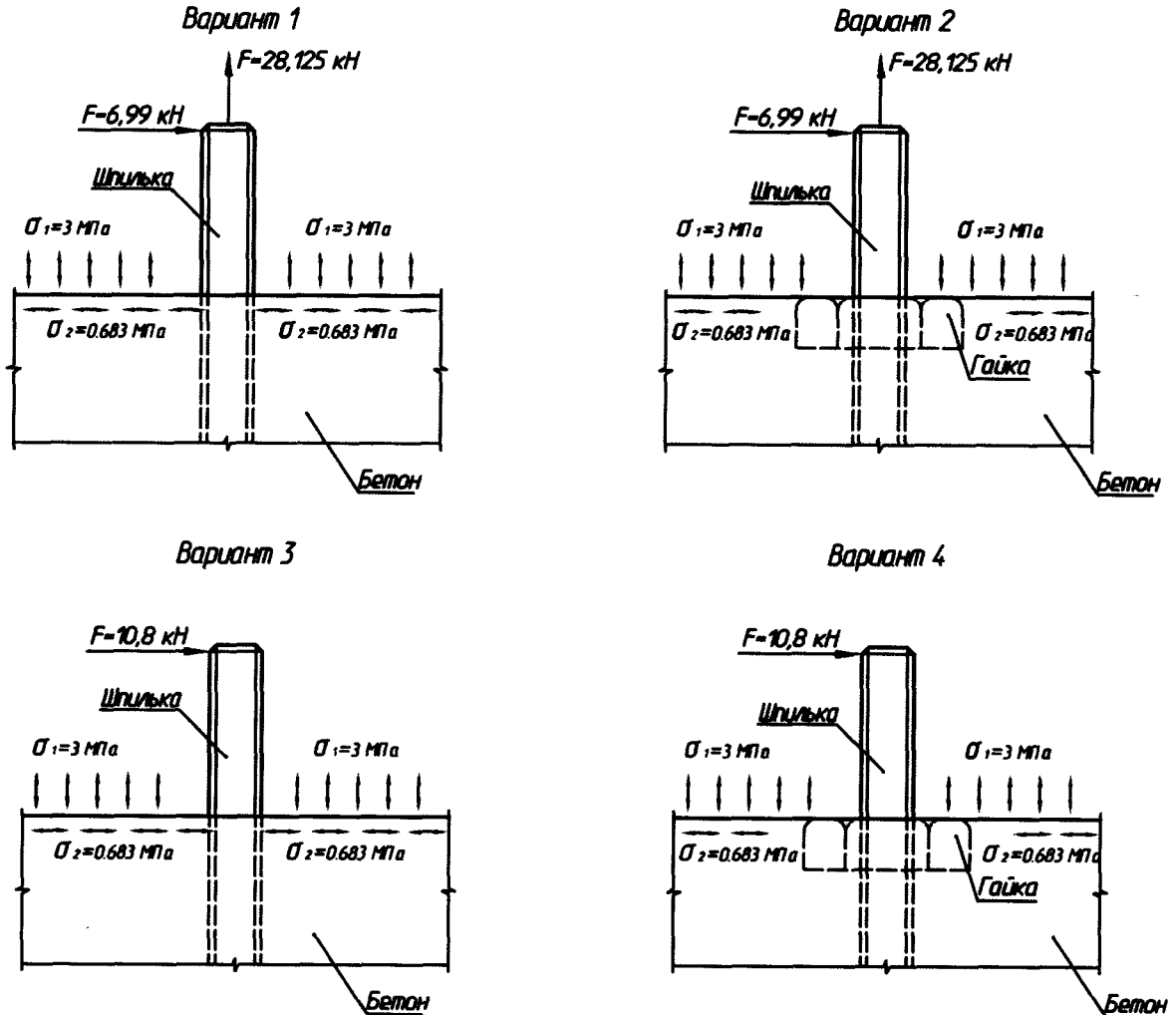


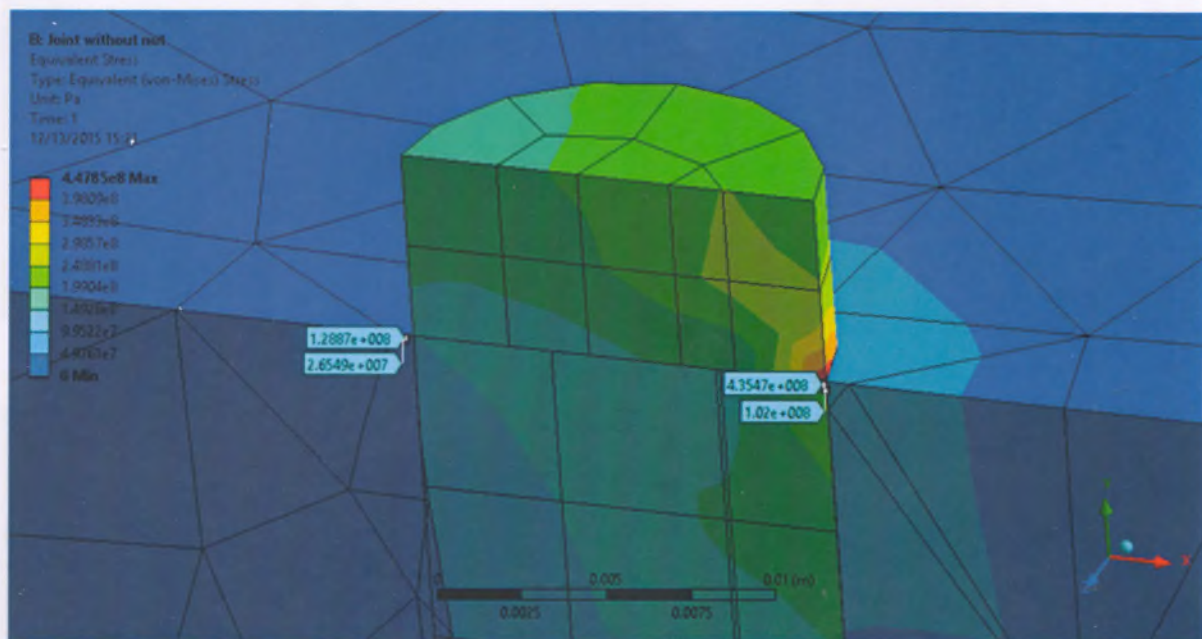
Рисунок 5 – Расчетная схема для определения напряжений в зоне контакта шпильки с бетоном

Для проверки проведенных расчетов параметров крепления шпильки использовался метод конечно-элементного математического моделирования узла крепления ДШ с последующим анализом изополей напряжений по Мизесу. Модуль упругости стали принят равным 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,29, для бетона –  $E = 47$  ГПа, коэффициент Пуассона – 0,2. Для уменьшения напряжений в зоне контакта шпильки

с бетоном смоделирована гайка М16 в уровне бетона омоноличивания (рис. 5, вариант 2).

Максимальные значения напряжений в местах крепления ДШ приведены на рисунках 6 и 7. Принимая во внимание требования таблицы 2 ГОСТ Р ИСО 3506-1 [7], получаем для шпильки М16 с шагом резьбы 1,5 необходимость применения стали А2 (с классом прочности 80) из условий коррозионной стойкости и прочности.

а)



б)

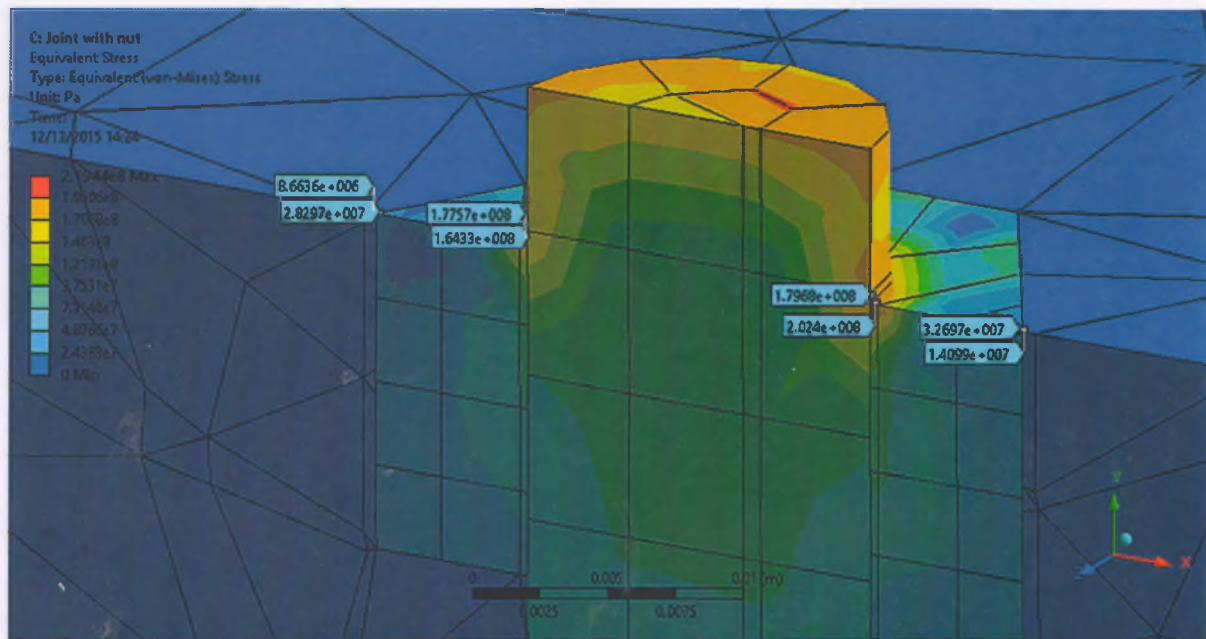
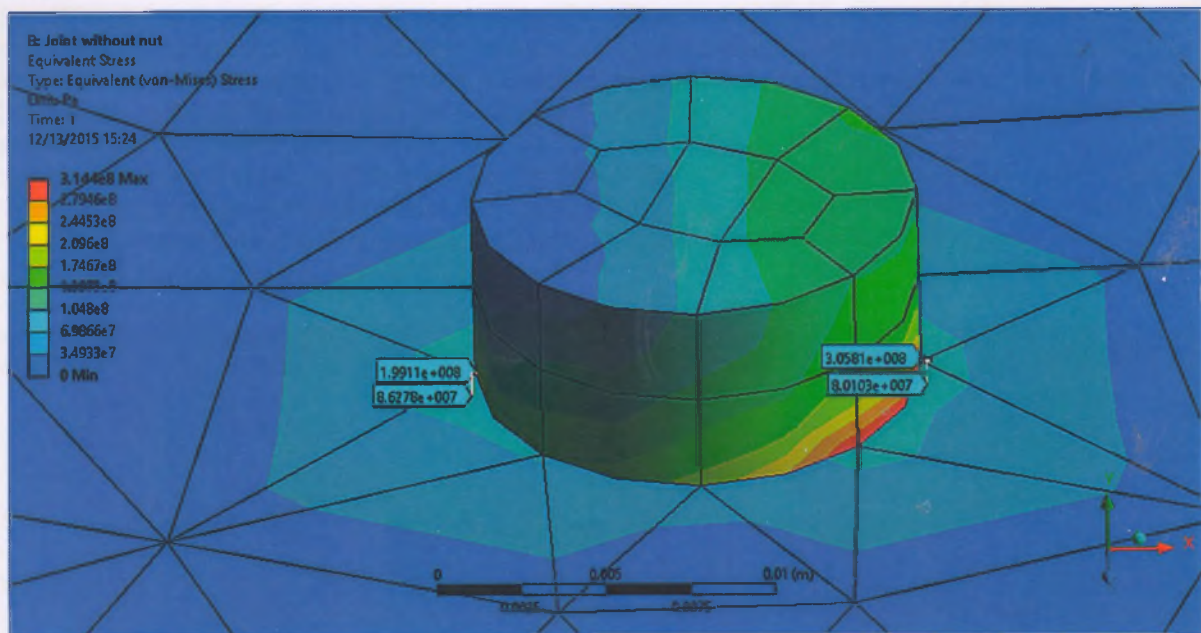


Рисунок 6 – Изополя напряжений в элементах узла крепления ДШ с учетом усилия сдвига резиновой пластины: а – для варианта 1 рисунка 5; б – для варианта 2 рисунка 5

a)



б)

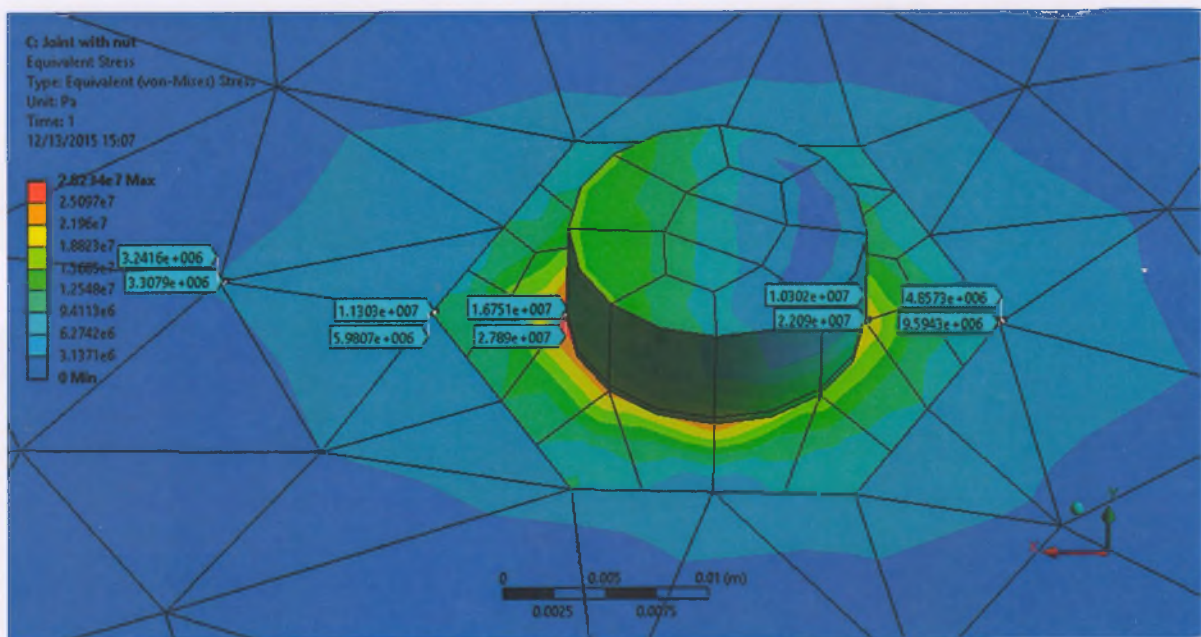


Рисунок 7 – Изополя напряжений в элементах узла крепления ДШ с учетом усилия сдвига резиновой пластины: а – для варианта 3 рисунка 5; б – для варианта 4 рисунка 5

Анализ полученных напряжений в зоне контакта шпильки с бетоном (вариант 2 рисунка 5 – 14,099 МПа) показал, что для восприятия расчетных горизонтальных и вертикальных нагрузок требуется применение высокопрочного бетона с пределом прочности на сжатие не менее 70–80 МПа [8].

### Заключение

Приведенный выше расчет усилий и напряжений свидетельствует о необходимости применения в узле крепления резинометаллического компенсатора шпильки и гайки М16 из нержавеющей стали А2 (с классом прочности 80), а также бетона омоноличивания шва с прочно-

стью на сжатие не менее 70–80 МПа. Важнейшим фактором, определяющим работоспособность узла крепления резинометаллического компенсатора, является наличие требуемого

усилия затяжки в шпильке (более 84,4 Н·м). Это усилие в узле крепления необходимо обеспечивать на протяжении всего жизненного цикла деформационного шва.

### Список использованной литературы

1. Веренько, В. А., Мытько, Л. Р. Проект дорожной одежды нежесткого типа / В. А. Веренько, Л. Р. Мытько / БНТУ. – Минск, 2010. – 244 с.
2. 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 (11). – С. 90–95.
3. Транспорт дорожный. Требования к техническому состоянию по условиям безопасности движения. Методы проверки : СТБ 1641-2006 / БелНИИТ «Транстехника». – Минск, 2006. – 32 с.
4. Углова, Е. В. Проектирование дорожных конструкций с учетом динамического воздействия современного транспортного потока / Е. В. Углова, А. С. Конорев, В. В. Акулов // Дороги и люди. – 2014. – № 3 (56). – С. 22–26.
5. Диагностика автомобильных дорог : учебное пособие / И. И. Леонович, С. В. Богданович / БНТУ. – Минск, 2012. – 226 с.
6. Инструкция по проектированию и установке полимерных опорных частей мостов : ВСН 86-83.
7. Механические свойства крепежных изделий из коррозионно-стойкой нержавеющей стали. Часть 1. Болты, винты и шпильки : ГОСТ Р ИСО 3506-1-2009.
8. Микульский, В. Г. Строительные материалы. Материаловедение / В. Г. Микульский – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 536 с.

Статья поступила в редакцию 28.09.2015.